

**Análisis de los efectos de la variación de los parámetros del modelo de línea, de carga
y de fuente, en la localización de fallas en sistemas de distribución**

Andrés Ricardo Herrera Orozco

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingenierías: Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación

Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica

Pereira

2013





**Análisis de los efectos de la variación de los parámetros del modelo de línea, de carga
y de fuente, en la localización de fallas en sistemas de distribución**

Andrés Ricardo Herrera Orozco

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
Magister en Ingeniería Eléctrica**

**Director:
PhD. Juan José Mora Flórez**



**Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ingenierías: Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación
Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica
Pereira
2013**

**Análisis de los efectos de la variación de los parámetros del modelo de línea, de carga
y de fuente, en la localización de fallas en sistemas de distribución**

Nota de aceptación

PhD. Juan José Mora Flórez
Director

PhD. Alejandro Garcés Ruiz
Jurado I

PhD. Antonio Escobar Zuluaga
Jurado II

Msc. Alberto Ocampo
Director del programa de
Maestría en Ingeniería Eléctrica

Agradecimientos

A Dios, por darme la capacidad, disciplina, salud y fuerza para seguir adelante con mis objetivos y el desarrollo de mis metas. A mi padre Julián, a mi madre Luz Marina y a mis hermanos Mauricio Alejandro, José Julián, Juan Manuel y Luis Miguel; por su gran apoyo y labor a lo largo de mi vida. A mi novia Lorena García, por su gran amor, apoyo y paciencia en esta etapa que estoy concluyendo. A mi tía María Regina (Q.E.P.D), por sus grandes consejos, apoyo y amor, a la cual siempre voy a llevar en mi corazón.

Además, quisiera agradecer al ingeniero Ph.D. Juan José Mora Flórez, por su amistad, apoyo y acompañamiento en la dirección de esta tesis y a lo largo de este trabajo. También, a mis compañeros y amigos de la maestría y del grupo de investigación ICE³ por todas las experiencias aprendidas junto a ellos. Finalmente, a los docentes de la maestría, quienes compartieron su conocimiento y experiencia, formándome para cumplir los objetivos hoy alcanzados.

Gracias.

Andrés Ricardo Herrera Orozco

CONTENIDO

Capítulo 1	15
1. Introducción	15
1.1. Motivación	15
1.2. Definición del problema	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Propuesta de solución	18
1.5. Aportes de la tesis	18
1.5.1. Artículos en revistas indexadas	19
1.5.2. Ponencias en congresos internacionales	19
1.5.3. Trabajo en proyectos de investigación	19
1.5.4. Tesis de pregrado asesoradas	20
1.6. Estructura del documento	20
Capítulo 2	21
2. Aspectos teóricos	21
2.1. Introducción	21
2.2. Aspectos teóricos del ATP/EMTP (Alternative Transients Program), software de simulación	21
2.3. Modelado de circuitos de distribución	22
2.3.1. Modelo de Cargas	23
2.3.2. Modelo de la fuente	26
2.3.3. Modelo de las líneas	29
2.3.4. Modelo de los transformadores	37
2.4. Generalidades de la localización de fallas en sistemas de distribución	40
2.5. Método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM)	41
2.6. Método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)	44
2.6.1. Fundamentación teórica del método	45
Capítulo 3	47

3. Metodología propuesta	47
3.1. Introducción	47
3.2. Modelado del sistema eléctrico enfocado al estudio de localización de fallas	47
3.2.1. Datos básicos de las líneas	47
3.2.2. Datos básicos de las cargas	48
3.2.3. Datos básicos de la subestación	49
3.2.4. Datos básicos del transformador	49
3.3. Modelado de cargas	50
3.3.1. Desarrollo del modelo	50
3.4. Modelado de fuentes	77
3.4.1. AC source (1&3):	77
3.4.2. Esquema final de la fuente	80
3.5. Modelado de líneas	81
3.5.1. Longitud del tramo de la línea	81
3.6. Modelado de los transformadores	83
3.7. Parámetros de los elementos del circuito que influyen en la localización de fallas en sistemas de distribución	86
Capítulo 4	87
4. Aplicación de la metodología propuesta	87
4.1. Introducción	87
4.2. Descripción de los circuitos de prueba	87
4.2.1. Circuito IEEE de 34 nodos	87
4.2.2. Circuito real tomado de una empresa de distribución (Circuito P2)	88
4.3. Pruebas realizadas y análisis de sensibilidad con los localizadores	89
4.3.1. Descripción del análisis	89
4.3.2. Análisis de sensibilidad del circuito de prueba IEEE de 34 nodos	94
4.3.2.1. Análisis con método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)	94
4.3.2.1.1. Validación a condición nominal método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)	94
4.3.2.1.2. Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga	96
4.3.2.1.3. Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente	101
4.3.2.1.4. Variaciones de la longitud del conductor de la línea	102

4.3.2.1.5.	Tablas de resumen de los principales resultados para el sistema de prueba IEEE de 34 nodos	105
4.3.2.1.6.	Conclusiones MBM E1.....	107
4.3.2.2.	Análisis con método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)	108
4.3.2.2.1.	Zonificación.....	108
4.3.2.2.2.	Resultados y análisis.....	109
4.3.2.2.3.	Conclusiones MBC	112
4.3.3.	Análisis de sensibilidad del circuito de prueba basado en datos reales (Circuito de prueba P2).....	112
4.3.3.1.	Análisis con método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)	112
4.3.3.1.1.	Validación a condición nominal método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1).....	112
4.3.3.1.2.	Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga.....	114
4.3.3.1.3.	Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente	119
4.3.3.1.4.	Variaciones de la longitud del conductor de la línea.....	121
4.3.3.1.5.	Tablas de resumen de los principales resultados para el sistema de prueba P2.....	124
4.3.3.1.6.	Conclusiones MBM E1.....	125
4.3.3.2.	Análisis con método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)	127
4.3.3.2.1.	Zonificación.....	127
4.3.3.2.2.	Resultados y análisis.....	128
4.3.3.2.3.	Conclusiones MBC	130
Capítulo 5	131
5.	Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	131
5.1.	Conclusiones generales	131
5.2.	Conclusiones asociadas al MBM.....	132
5.3.	Conclusiones asociadas al MBC.....	134
5.4.	Recomendaciones y trabajos futuros.....	134
Bibliografía	135
Anexos	142

Anexo A.1. Código fuente escrito en lenguaje <i>fortran</i> y que fue implementado en el <i>Models Type-94</i> en su versión Norton non-tranmission.....	142
Anexo A.2. Análisis de los efectos de la inyección de falla en la estabilidad de los modelos de la carga en el ATP/EMTP.....	148
1. Introducción.....	148
2. Metodología propuesta	148
3. Resultados y análisis.....	150
4. Conclusiones	210
Anexo B.1. Gráficas para análisis de sensibilidad del circuito IEEE de 34 nodos con el MBM E1	211
1. Validación a condición nominal con circuito modelado como Z_{cte}	211
2. Variaciones de carga	212
2.1. Validación a condición aleatoria de Carga [10-30]%	212
2.2. Validación a condición aleatoria de Carga [60-100]%	216
2.3. Validación a condición aleatoria de Carga [135-145]%	219
3. Variación aleatoria de la magnitud de la tensión de la Fuente	223
3.1. Variación aleatoria de la Tensión de la Fuente [0.95 – 1.05].....	223
4. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores.....	225
4.1. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [95 - 98]%.....	225
4.2. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [98 - 102]%.....	226
4.3. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [102 - 105]%	228
Anexo B.2. Gráficas para análisis de sensibilidad del sistema de prueba P2 con el MBM E1230	230
1. Validación a condición nominal con circuito modelado como Z_{cte}	230
2. Variaciones de carga	231
2.1. Validación a condición aleatoria de Carga [30 - 60]%	231
2.2. Validación a condición aleatoria de Carga [80-100]%	234
2.3. Validación a condición aleatoria de Carga [110-130]%	237
3. Variación aleatoria de la magnitud de la tensión de la Fuente	240
3.1. Variación aleatoria de la Tensión de la Fuente [0.95 – 1.05].....	240
4. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores.....	241
4.1. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [95 - 98]%.....	241
4.2. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [98 - 102]%.....	243
4.3. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [102 - 105]%	244

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2.

Figura 2. 1. Esquema de una subestación de distribución sencilla.....	26
Figura 2. 2. Modelo para una fuente en estado estable	28
Figura 2. 3. Formas de ondas básicas de voltaje y corriente de excitación.....	28
Figura 2. 4. Menú de fuentes en ATP y ATPDraw	29
Figura 2. 5. Modelo exacto de línea trifásica	29
Figura 2. 6. Modelos de líneas disponibles en el <i>ATPDraw</i>	32
Figura 2. 7. Modelo RLC <i>pi</i> equivalente.....	33
Figura 2. 8. Modelo RL <i>pi</i> acoplado	33
Figura 2. 9. Modelos de línea con parámetros distribuidos del <i>ATPDraw</i>	34
Figura 2. 10. Modelos de línea LCC	35
Figura 2. 11. Datos de parámetros eléctricos y de distribución geométrica para simulación con LCC	36
Figura 2. 12. Datos de características adicionales, según naturaleza de la línea.....	37
Figura 2. 13. Modelo de transformador saturable	38
Figura 2. 14. Modelo de transformador BCTRAN	39
Figura 2. 15. Modelo de transformador híbrido (XFMR)	40
Figura 2. 16. Circuito equivalente en estado de pre-falla.....	42
Figura 2. 17. Circuito equivalente en estado de falla	42
Figura 2. 18. Circuito equivalente superpuesto.....	42
Figura 2. 19. Hiperplanos que separan correctamente un conjunto de datos. A) Hiperplano de separación de datos. B) OSH con un mayor margen de separación entre clases.	46

Capítulo 3.

Figura 3. 1. Formato general de descripción para un <i>Models</i>	51
Figura 3. 2. Resistencia	52
Figura 3. 3. Inductor.....	52
Figura 3. 4. Equivalente de Norton del inductor	53
Figura 3. 5. Circuito <i>RL</i> para obtener equivalente de Norton	54
Figura 3. 6. Equivalente de Norton para el circuito <i>RL</i>	55
Figura 3. 7. Oscilación numérica en señal de tensión	56
Figura 3. 8. Circuito para inductancia con resistencia de amortiguamiento	57
Figura 3. 9. Circuito equivalente de Norton para inductancia con resistencia de amortiguamiento .	58
Figura 3. 10. Circuito <i>RL</i> con resistencia de amortiguamiento <i>Ram</i> , para obtener el correspondiente equivalente de Norton	59
Figura 3. 11. Señal de tensión luego de abolir la oscilación numérica	61
Figura 3. 12 (a). Característica de la carga para el modelo de potencia constante (S_{cte}). (b). Característica de la carga para el modelo de corriente constante (I_{cte}).	62

Figura 3. 13 (a). Ventana de datos del modelo de la carga programado por medio de la herramienta de <i>Models</i> del ATP en ATPDraw. (b). Esquema del modelo programado en el ATPDraw.	63
Figura 3. 14. Diagrama de flujo que se siguió para realizar la programación del modelo de la carga por medio de la herramienta de <i>Models</i> del ATP.....	64
Figura 3. 15. Ventana de ingreso de datos para el transformador ΔY_5	66
Figura 3. 16. Diagrama circuital del transformador ΔY_5	66
Figura 3. 17. Diagrama circuital con impedancia referida al lado primario del transformador ΔY_5	67
Figura 3. 18 (a). Carga trifásica implementada con el modelo de la carga programado, con conexión en estrella (Y), (b). Carga equivalente pero modelada con conexión en Delta (Δ).	68
Figura 3. 19. Gráfico comparativo para magnitud de tensión de pre-falla en la S/E	71
Figura 3. 20. Gráfico comparativo para ángulo de tensión de pre-falla en la S/E.....	71
Figura 3. 21. Gráfico comparativo para magnitud de impedancia de falla en centro de generación distribuida.....	72
Figura 3. 22. Gráfico comparativo para ángulo de impedancia de falla en centro de generación distribuida.....	72
Figura 3. 23. Ruta de acceso para el modelo de fuente “AC source (I&3)” y su respectiva ventana de datos.....	78
Figura 3. 24. Circuito de prueba para el modelo de fuente trifásica	79
Figura 3. 25. Tensión eficaz en terminales de la fuente cuando ocurre una falla 3 ϕ	79
Figura 3. 26. Esquema usado para el modelo del circuito antes de la conexión con las líneas y cargas.....	81
Figura 3. 27. Esquema para vanos nivelados	82
Figura 3. 28. Esquema para vanos desnivelados	82
Figura 3. 29. (a). Esquema de la subestación del circuito IEEE de 34 nodos modelando con el transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con el transformador saturable.	84
Figura 3. 30. (a). Señales de tensión en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.	84
Figura 3. 31. (a). Señales de corriente en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.	85

Capítulo 4.

Figura 4. 1. Sistema de prueba IEEE de 34 nodos como es presentado por ATPDraw, con las cargas modeladas con el bloque de la carga implementado	88
Figura 4. 2. Sistema de prueba P2 como es presentado por ATPDraw, con las cargas modelada con el bloque de la carga implementado	89
Figura 4. 3. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla monofásica.	95
Figura 4. 4. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla bifásica.	95
Figura 4. 5. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla trifásica.....	95
Figura 4. 6. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de I_{cte}	96

Figura 4. 7. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de S_{cte} .	97
Figura 4. 8. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de carga original del IEEE de 34 nodos.	97
Figura 4. 9. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [60 - 100] %, para modelo de S_{cte} .	98
Figura 4. 10. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [60 - 100] %, para modelo de S_{cte} .	99
Figura 4. 11. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .	99
Figura 4. 12. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .	100
Figura 4. 13. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .	101
Figura 4. 14. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .	101
Figura 4. 15. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de tensión en la fuente [0.95 – 1.05] p.u, para modelo de S_{cte} .	102
Figura 4. 16. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [95 – 98] %, para modelo de S_{cte} .	103
Figura 4. 17. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [98 – 102] %, para modelo de S_{cte} .	104
Figura 4. 18. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [102 – 105] %, para modelo de S_{cte} .	105
Figura 4. 19. Zonificación del circuito IEEE de 34 nodos	109
Figura 4. 20. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla monofásica.	113
Figura 4. 21. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla bifásica.	113
Figura 4. 22. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla trifásica.	113
Figura 4. 23. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [30 - 60] %, para modelo de S_{cte} .	114
Figura 4. 24. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [30 - 60] %, para modelo de S_{cte} .	115
Figura 4. 25. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de carga S_{cte} .	115
Figura 4. 26. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [80 - 100] %, para modelo de S_{cte} .	116
Figura 4. 27. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [80 - 100] %, para modelo de S_{cte} .	117
Figura 4. 28. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .	117
Figura 4. 29. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .	118
Figura 4. 30. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .	119
Figura 4. 31. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .	119

Figura 4. 32. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de tensión en la fuente [0.95 – 1.05] p.u, para modelo de S_{cte}	120
Figura 4. 33. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte}	121
Figura 4. 34. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte}	122
Figura 4. 35. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [102 – 105] %, para modelo de S_{cte}	124
Figura 4. 36. Zonificación del circuito prueba P2	128

LISTA DE TABLAS

Capítulo 3.

Tabla 3. 1. Información de líneas para el sistema IEEE 34 nodos	48
Tabla 3. 2. Tipos de estructuras del sistema IEEE 34 nodos.....	48
Tabla 3. 3. Información de cargas para el sistema IEEE 34 nodos	49
Tabla 3. 4. Información del transformador para el sistema IEEE 34 nodos.....	49
Tabla 3. 5. Índice de relación de impedancia de falla (α) para el sistema de prueba considerando variación de la carga.....	75
Tabla 3. 6. Error en la localización en el sistema de prueba IEE de 34 nodos considerando falla monofásica	76
Tabla 3. 7. Error en la localización en el sistema de prueba IEE de 34 nodos considerando falla bifásica	76
Tabla 3. 8. Error en la localización en el sistema de prueba IEE de 34 nodos considerando falla trifásica.....	76
Tabla 3. 9. Valores de estado estable de las señales de tensión y corriente, tanto en magnitud como en ángulo, en estado de pre-falla y falla, con el circuito modelado con el transformador híbrido XFMR y el transformador <i>saturable</i>	85

Capítulo 4.

Tabla 4. 1. Condición nominal de los circuitos de prueba	90
Tabla 4. 2. Escenarios planteados para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos	91
Tabla 4. 3. Escenarios planteados para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos	92
Tabla 4. 4. Número de registros de falla simulados o descriptores de falla obtenidos para cada uno de los circuitos de prueba.	93
Tabla 4. 5. Rango de error a condición nominal.	106
Tabla 4. 6. Rango de error para variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga... ..	106
Tabla 4. 7. Rango de error para variación aleatoria de la fuente.....	106
Tabla 4. 8. Rango de error para variación aleatoria de la longitud de los conductores.....	106
Tabla 4. 9. Zonificación del circuito IEEE de 34 nodos	108
Tabla 4. 10. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la carga.	110
Tabla 4. 11. Entrenamiento y validación con escenario para variación de la tensión.	110

Tabla 4. 12. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la línea.	111
Tabla 4. 13. Rango de error a condición nominal.	124
Tabla 4. 14. Rango de error para variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga.	124
Tabla 4. 15. Rango de error para variación aleatoria de la fuente.	125
Tabla 4. 16. Rango de error para variación aleatoria de la longitud de los conductores.	125
Tabla 4. 17. Zonificación del circuito de prueba P2	127
Tabla 4. 18. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la carga.	129
Tabla 4. 19. Entrenamiento y validación con escenario para variación de la tensión.	129
Tabla 4. 20. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la línea.	130

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Motivación

Los sistemas de distribución son una parte importante del sistema de potencia y están directamente relacionados con el usuario final, por lo que se requiere mantener altos niveles en la calidad de la energía [IEEE04]. Por ello, la actividad investigativa en temas asociados con calidad ha experimentado un fuerte avance en las últimas décadas específicamente en lo relacionado con la forma de onda, la continuidad del servicio y la atención al cliente [BOLL00]. La importancia actual de estos aspectos está asociada a que la participación del capital privado en el sector eléctrico obliga a establecer pautas de remuneración e índices mínimos de calidad [CREG08] [GELL02]. La calidad del producto implica satisfacer condiciones de calidad de onda (o de potencia) y de continuidad de suministro [MORA06a].

El problema aquí abordado se encuentra asociado a la continuidad del suministro. Éste, en un principio fue cuantificado con dos indicadores, duración equivalente de interrupciones de servicio (DES) y frecuencia equivalente de las interrupciones del servicio (FES). Éstos fueron definidos y aplicados a las empresas distribuidoras de energía eléctrica por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en la resolución 070 de 1998. Posteriormente en el año 2008 con la resolución 097 [CREG08], se definieron nuevos indicadores de continuidad como el índice de referencia agrupado de la discontinuidad (IRAD) y el índice trimestral agrupado de la discontinuidad (ITAD). Estos índices cuantifican la continuidad del servicio ofrecido por la empresa de energía, permitiendo variar los cargos por uso de la red.

Las fallas en los sistemas de distribución afectan negativamente estos índices y por tanto su mejoramiento se ha convertido en un objetivo importante para las empresas de energía, pues éste les evitaría el pago de penalizaciones y el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica suministrada. Actualmente existen diversas aplicaciones que estiman tanto la distancia a la falla como la zona en falla, por medio de técnicas tales como los métodos basados en el modelo (MBM) y métodos basados en el conocimiento (MBC) [MORA06a]. Sin embargo, un aspecto importante para el excelente desempeño de los localizadores es el modelado del circuito de prueba; el cual, a su vez está compuesto de ciertos parámetros que dependiendo de su valor tienen repercusión en los métodos de localización (MBM y MBC).

Al realizar la simulación de sistemas de distribución por medio de un software específico, se encuentra que el circuito puede ser apreciablemente diferente del sistema que se tiene en

campo. Estas diferencias afectan de una manera considerable el desempeño de los localizadores ya que todos los métodos se basan en un modelo del sistema. Un caso común y dado por la ausencia de información en las empresas de distribución conlleva a que existan parámetros del modelado del circuito que se asumen, y por tanto puedan ser diferentes a las situaciones que se reproducen en el circuito en campo, como el valor y el tipo de la carga, la resistencia de falla, la tensión del circuito, la variación en los acoples mutuos, la resistividad del terreno, la distancia entre conductores, entre los más importantes.

Considerando lo anterior, la realización de este trabajo está motivada en su mayor parte por la presunción que: *“Un correcto análisis de los parámetros del modelo que influyen en los localizadores de falla, permitirá mejorar el conocimiento de los localizadores y así obtener información sobre qué propuesta de localizador se comporta mejor ante escenarios de variaciones de cada parámetro”*.

El desarrollo del proyecto permitirá una eficiente y oportuna localización de las fallas, al utilizar el localizador adecuado y por consiguiente el mejoramiento de los índices de continuidad de servicio de energía eléctrica.

1.2. Definición del problema

La desregulación del mercado eléctrico ha permitido que aspectos como la calidad sean de gran importancia para las empresas distribuidoras de energía. Como una parte de la calidad está relacionada con la continuidad del suministro, las metodologías propuestas para la localización de fallas son cada vez más numerosas, ya que cada día surgen nuevos métodos y diferentes maneras de analizar este problema.

Así mismo, el IRAD y el ITAD se pueden mejorar considerando que: a) la reducción de la frecuencia de ocurrencia de fallas se produce cuando se localizan fallas transitorias y auto-extinguibles, ya que permiten localizar áreas débiles en el sistema de distribución, evitando futuras fallas permanentes; b) la duración de la falla se reduce debido a que la pronta localización del sitio de falla, reduce el tiempo de restauración del servicio de energía eléctrica.

Como propuesta de solución, existe una gran cantidad de métodos utilizados para la localización de fallas en sistemas de distribución que estiman la localización a partir de las tensiones y corrientes medidas en la subestación. Hay métodos que utilizan el modelo del sistema para realizar un análisis del circuito para estimar la localización de una falla [NOVO98], [MORA08], [CHOI04]; estas técnicas son conocidas como métodos basados en el modelo (MBM). Otro tipo de estrategias se basan en encontrar una zona de falla del circuito a partir de una base de registros de fallas del sistema de distribución bajo análisis y una técnica de regresión o clasificación, y se conocen como métodos basados en el conocimiento (MBC) [THUK06], [JAVA09], [MORA06a] [MORA09]. Así, la tarea de

localización de fallas es fuertemente dependiente del modelo y de los parámetros que lo componen, y por tanto el correcto modelado y análisis de los efectos de estos parámetros del sistema de distribución es muy importante.

Los sistemas de distribución reales implementados en simuladores, en muchas ocasiones se deben simplificar por diversos motivos, entre los cuales el más importante es la falta de información detallada en las empresas operadoras de red. Por lo tanto, a partir de esta investigación se propone realizar un análisis de los efectos que tiene la variación de los parámetros de la fuente, de los tramos de línea y de la carga, que son los más importantes del modelo, para determinar su influencia en los localizadores de falla. Así, con esta información se puede seleccionar el localizador que debe ser utilizado ante casos de ausencia de información de ciertos parámetros, lo que propende por una más eficiente y mejor localización de la falla. Adicionalmente, la realización de este análisis permitirá mejorar la robustez de los localizadores al encontrar posibles puntos débiles de cada uno de éstos, permitiendo su posterior mejoramiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Adaptar y desarrollar modelos de los circuitos de distribución y determinar la influencia de los parámetros de la línea, de la carga y de la fuente en algunos métodos de localización de falla.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Revisar la bibliografía disponible sobre modelado de sistemas de distribución para aplicaciones de localización de fallas.
- b) Estudiar el modelado y caracterización de la línea, de la fuente y de la carga en circuitos de distribución.
- c) Realizar la simulación de los diferentes elementos y circuitos por medio del software ATP.
- d) Estudiar dos localizadores desarrollados por el grupo ICE³, un MBM (Método adaptado a partir del propuesto por Damir Novosel) y un MBC (Basado en máquinas de soporte vectorial SVM) para la localización de fallas.
- e) Realizar pruebas de análisis de sensibilidad del modelo de los diferentes elementos estudiados y su influencia en los localizadores de falla.
- f) Desarrollar un documento donde se condensen todos los estudios y resultados obtenidos en esta investigación.

1.4. Propuesta de solución

La propuesta de solución está orientada al análisis de los efectos de la variación de los parámetros de los modelos de los tramos de línea, de la fuente y de la carga en los localizadores de fallas.

Inicialmente se debe realizar un estudio bibliográfico extensivo de los diferentes elementos que conforman los circuitos de distribución, especialmente los modelos para las fuentes, de la carga y de los tramos de línea, con el fin de evaluar y seleccionar los modelos más adecuados y que presenten un buen comportamiento para la localización de fallas. Estos modelos serán caracterizados en el software “Alternative Transients Program” (ATP).

Posteriormente se estudiarán dos métodos de localización implementados por el grupo de investigación ICE³, un MBM (Método adaptado a partir del propuesto por Damir Novosel [NOVO98]) y un MBC (Basado en máquinas de soporte vectorial – SVM). Estos localizadores son los que servirán para realizar el análisis de sensibilidad de acuerdo a la variación de los parámetros.

Como etapa posterior, se debe realizar la selección de los parámetros que más influencia tienen en el modelado de los componentes. Se propone una variación de éstos, obteniendo así diferentes escenarios que luego serán evaluados por medio de los localizadores propuestos, para posteriormente analizar los efectos que produce la variación de los parámetros en el desempeño de los localizadores de falla evaluados.

Finalmente, con la recopilación de la información y análisis realizados en el transcurso de la investigación, se desarrollará un documento que contenga todos los resultados del proyecto.

1.5. Aportes de la tesis

El aporte principal de esta tesis es el desarrollo de modelos de los circuitos de distribución utilizados en los estudios de localización de fallas, proporcionando una herramienta de estudio que permitirá realizar un modelado más adecuado de acuerdo a la información que se tenga de los sistemas que se deseen analizar. Además, servirá como base para los estudios de localización de fallas que se realizan por el grupo de investigación. Adicionalmente, se desarrolló un nuevo bloque de modelo de la carga en el ATP/EMTP, el cual hasta ahora no había sido incluido en estudios de localización de fallas. Asimismo, un índice (α) basado en la impedancia fue propuesto para predecir el comportamiento de los localizadores de falla (MBM).

También es importante resaltar que se realizan análisis de sensibilidad de los localizadores considerando variaciones a los parámetros de los principales elementos del circuito, como los modelos de la línea, de la carga y de la fuente, lo cual también ayuda al enriquecimiento

de los estudios en localización realizados por el equipo de trabajo, y permite mejorar la robustez de los localizadores al encontrar posibles puntos débiles en los mismos.

Finalmente, esta tesis también está sustentada parcialmente en los aportes presentados en las siguientes publicaciones:

1.5.1. Artículos en revistas indexadas

Artículo en proceso de revisión: A. Herrera-Orozco, A. Bedoya-Cadena, J. Mora-Flórez. “A robust fault locator for power distribution systems considering distributed generation and uncertainties in load”. Transaction on power delivery IEEE. 2013.

Artículo en proceso de revisión: A. R. Herrera-Orozco, J. Mora-Flórez, S. Perez-Londoño. “An impedance relation index to predict the fault locator performance considering different load models”. Journal Electric Power System Research. ELSEVIER. 2013.

Artículo en proceso de publicación: J. Patiño-Duque, A. Herrera-Orozco, J. Mora-Flórez. “Simulación y validación del modelo polinomial de la carga utilizando ATP/EMTP”. Revista Scientia et Technica. Universidad Tecnológica de Pereira, Agosto 2012.

1.5.2. Ponencias en congresos internacionales

A. Herrera-Orozco, S. Perez-Londoño, J. Mora-Flórez. “Load modeling for fault location in distribution systems with distributed generation” presented in Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference. September, 2012 / Montevideo – Uruguay.

1.5.3. Trabajo en proyectos de investigación

“Propuesta metodológica para el modelado de sistemas de distribución utilizados en localización de fallas paralelas”. Programa de jóvenes investigadores e innovadores 2011 Virginia Gutiérrez de Pineda, Colciencias.

“Desarrollo de estrategias para mejorar la continuidad del servicio de energía eléctrica a partir de la localización de fallas en sistemas de distribución”. Proyecto de investigación desarrollado para CODENSA por los grupos de investigación ICE3 (Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad) de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y GISEL (Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

“Determinación de fallas paralelas de baja impedancia, como estrategia base para reducir la frecuencia y el tiempo de interrupción del suministro de energía eléctrica a los usuarios de las redes de distribución de EPM”. Proyecto de investigación desarrollado para Empresas Publicas de Medellín (EPM) por los grupos de investigación ICE3 (Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad) y GPE Grupo de Planeamiento en Sistemas Eléctricos (GPE) de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

1.5.4. Tesis de pregrado asesoradas

Asesor de la tesis titulada “Estudio del modelado de la carga en sistemas de distribución y su influencia para localización de fallas”. Desarrollada por el estudiante Jhon Fredy Patiño Duque. Julio 2012.

1.6. Estructura del documento

Este documento esta dividido en cinco capítulos. El primer capítulo es introductorio, y en él se exponen los principales motivos para la realización de este trabajo, la definición del problema, los objetivos trazados, la propuesta de solución a desarrollar y los principales aportes de la tesis.

El capítulo dos se enfoca en exponer los aspectos teóricos mas relevantes a tener en cuenta en el desarrollo de la tesis; inicialmente se expone el software de simulación a utilizar para realizar el modelado de los elementos y sus principales características (ATP/EMTP), luego se explica de forma detallada los modelos de los principales elementos que componen un circuito de distribución, como son las cargas, las fuentes y los tramos de línea; y también se muestra la forma como se encuentran en el software utilizado. Finalmente, se exponen algunas generalidades en la localización de fallas y se explican dos métodos de localización de falla, un MBM y un MBC que serán usados en el desarrollo de esta tesis.

Luego en el capítulo tres, se presenta la metodología propuesta para el modelado de los diferentes elementos seleccionados y su validación por medio del software ATP/EMTP. Adicionalmente, se exponen los parámetros de los elementos del circuito que influyen en la localización de fallas en sistemas de distribución.

En el capítulo cuatro, se muestra la aplicación de la metodología, en donde se presentan los sistemas de pruebas y los diferentes análisis de sensibilidad realizados con los localizadores de falla expuestos.

Finalmente, en el capítulo cinco se exponen las conclusiones más relevantes obtenidas en el desarrollo de esta investigación y se presentan algunas recomendaciones a tener en cuenta en trabajos futuros que se puedan desprender de este proyecto.

Capítulo 2

2. Aspectos teóricos

2.1. Introducción

En este capítulo se tratan los aspectos teóricos más relevantes de esta investigación, para lo cual este capítulo se divide en cinco secciones.

La primera sección está asociada con los aspectos teóricos del software de simulación utilizado para el desarrollo de este trabajo (ATP/EMTP), en el cual se modelan los diferentes sistemas de pruebas y elementos estudiados. La segunda sección, se relaciona con el modelado de los circuitos de distribución y a su vez de los diferentes modelos de los elementos que lo componen, como son las cargas, las fuentes y las líneas; en él se expone la teoría que rodea a cada elemento, también se presenta como son modelados estos elementos en el ATP/EMTP. La siguiente sección se centra en las generalidades de la localización de fallas en sistemas de distribución. Finalmente, en las dos últimas secciones se exponen dos metodologías de localización de fallas en sistemas de distribución, como lo son un MBM, método propuesto por a partir del método de Damir Novosel y un MBC, que es un método de localización basado en Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) respectivamente.

2.2. Aspectos teóricos del ATP/EMTP (Alternative Transients Program), software de simulación

El software utilizado para el modelado y la simulación de los circuitos de prueba es el ATP (Alternative Transients Program). Este en sus primeras versiones fue llamado EMTP (“Electro Magnetic Transient Program”). Este software se creó en la década de los 60s por el Dr. Hermann Dommel, quien luego cedió sus derechos a la “Boneville Power Administration” (BPA). La BPA lo liberó para evadir costos asociados a su mantenimiento, para lo cual lo tomó la “Electric Power Research Institute” (EPRI), años más tarde sus colaboradores junto con un grupo europeo crearon la versión para PC llamado ATP, con la diferencia que este último maneja diferentes plataformas para su interfaz gráfica, pero conserva la misma máquina de solución del EMTP (fortran), haciéndolo un software rápido y confiable [ATPR11].

El ATP/EMTP es un programa de simulación universal que sirve para modelar sistemas complejos en el dominio del tiempo, también para realizar mediciones de las señales y realizar estudios de análisis transitorios [HORP02]. Lo cual permite realizar estudios de calidad de la energía relacionados con la localización de fallas en sistemas de distribución.

Algunas ventajas que posee este software de simulación son:

- Tiene una distribución gratuita mediante grupos de usuarios. Esta condición lo hace atractivo para su uso, lo cual permite tener una referencia bastante amplia sobre su aplicación.
- Utiliza modelos detallados para simular en forma precisa los transitorios ocurridos durante periodos cortos, permitiendo su aplicación en análisis de fallas.
- Su facilidad de manejo mediante programas adicionales como el *ATPDraw*, que interactúa con el usuario de forma gráfica.
- Utiliza diferentes modelos para representar líneas de distribución y transmisión, los cuales manejan diferente información, dependiendo de los datos que se disponen.
- Permite crear nuevos bloques de simulación, como módulos de protección implementados por el grupo de investigación.
- El ATP, posee la capacidad de programar módulos TACS (Transient Analysis of Control Systems) y MODELS (un lenguaje de simulación), que permite modelar los sistemas de control y los componentes con características no lineales como son arcos eléctricos y otros elementos del sistema [DUBE96].
- El ATP, emplea la integración trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema en el dominio del tiempo, lo que permite realizar fácilmente la discretización de las ecuaciones de los elementos que se deseen implementar [WATS07].
- Este software realiza el cálculo de la respuesta fasorial de las redes, en función de la frecuencia utilizando un escaneo de frecuencia y tiene la capacidad de realizar un análisis armónico en el dominio de la frecuencia utilizando el método de inyección de corriente armónica.
- Los manuales y publicaciones referentes a su uso, se manejan mediante grupos de usuarios, lo que permite obtenerlo fácilmente.
- Su facilidad de iteración con otros programas utilizados en la academia, como son el *Matlab*.
- Su popularidad en el gremio académico.

Así queda establecido, la importancia del manejo de dicho software para llevar a cabo este proyecto, además de sus subprogramas como el *ATPDraw* y la iteración del mismo con *Matlab*.

2.3. Modelado de circuitos de distribución

Para modelar los sistemas de distribución es importante conocer y definir adecuadamente los modelos de los componentes que integran el circuito y a su vez definir como estos componentes deben operar para realizar un correcto estudio de localización de fallas. En general, para la validación de metodologías de localización de fallas (MBM y MBC) se utiliza el modelo de un sistema de distribución. Para realizar la etapa de modelado de un sistema de la manera más aproximada al comportamiento real del sistema es necesario conocer los aspectos físicos y topológicos, al igual que datos eléctricos del sistema [SVOB98] [GONE86]. Los datos que requiere cada simulador se diferencian dependiendo del propósito para el cual estos fueron diseñados, y también de la forma como procesan la información.

Algunos aspectos teóricos del modelado de los componentes más importantes que forman parte del sistema de distribución se exponen a continuación.

2.3.1. Modelo de Cargas

En la localización de fallas en sistemas de distribución a través de técnicas dependientes del modelo del sistema, un factor clave es el correcto modelado de las cargas eléctricas. Un pobre modelado puede influir de manera significativa en la precisión de los localizadores (MBM o MBC), ya que estos utilizan las medidas de tensión y corriente en el centro de generación para realizar la estimación de la falla [HERR12].

El modelado de cargas eléctricas es un campo difícil de abordar debido a las particularidades que éste presenta. Entre las características más relevantes se pueden nombrar las siguientes [IEEE93]:

- Las cargas eléctricas se encuentran compuestas por una gran cantidad de componentes que por lo general no se pueden caracterizar totalmente.
- La propiedad y ubicación de las cargas no son de fácil acceso para las empresas distribuidoras de energía.
- Las cargas eléctricas cambian de composición y magnitud con el tiempo (día, semana, mes, temporada, etc.) [CHAO95].
- La información que se toma como guía para determinar la composición por lo general es limitada.

Por otro lado, las cargas en los sistemas de distribución pueden ser modeladas como conexiones estrella (Y) o delta (Δ); pueden ser trifásicas, bifásicas o monofásicas, con algún grado de desbalance y pueden ser modeladas como [KERS02]:

- Potencia constante (S_{cte})
- Corriente constante (I_{cte})
- Impedancia constante (Z_{cte})
- Alguna combinación de las anteriores.

Adicionalmente, existen diferentes modelos determinísticos de la carga que están definidos en la literatura especializada; estos modelos son desarrollados de acuerdo a la aplicación para la que se deseen emplear. Existen por tanto los modelos estáticos y los modelos dinámicos [DIAS89], [KARL94]. A continuación se exponen los dos tipos de modelos de la carga mencionados.

2.3.1.1. Modelos estáticos

Los modelos estáticos son aquellos que generalmente pueden ser representados como una función polinomial de la tensión aplicada [AGUE06], [SERN10], [IEEE93]. En general la carga es representada como se muestra en la ecuación (2.1)

$$S = P_n \sum_{k=0}^{n_p} a_{pk} \cdot (V_{(x),p.u})^{b_{pk}} + jQ_n \sum_{k=0}^{n_q} a_{qk} \cdot (V_{(x),p.u})^{b_{qk}} \quad (2.1)$$

$\sum_{k=0}^{n_p} a_{pk} = \sum_{k=0}^{n_q} a_{qk} = 1$

Donde:

$V_{(x),p.u}$	Tensión de fase de la carga en por-unidad (p.u), en el nodo (x) .
n	Subíndice que denota el valor nominal de la variable.
a_p/a_q	Coefficientes de participación de potencia.
n_p/n_q	Numero de coeficientes de participación de potencia (Usualmente 3).
b_p/b_q	Exponente de potencia característico.

Este modelo es comúnmente conocido como el modelo ZIP (impedancia constante Z_{cte} , corriente constante I_{cte} , potencia constante S_{cte}) [IEEE93].

De otra parte, un caso especial es presentado en la ecuación (2.2), para representar el modelo exponencial de la carga [AGUE06], [IEEE93].

$$S = P_n \cdot (V_{(x),p.u})^{b_p} + jQ_n \cdot (V_{(x),p.u})^{b_q} \quad (2.2)$$

En este caso, b_p y b_q son valores reales. Si $b_p = 0$, la carga consume la misma potencia a pesar de las fluctuaciones en la magnitud de la tensión (S_{cte}). Si $b_p = 1$, la carga consume la misma corriente a pesar de las fluctuaciones en la magnitud de la tensión (I_{cte}). En el caso de $b_p = 2$, la carga presenta la misma impedancia a pesar de las fluctuaciones en la magnitud de la tensión (Z_{cte}). La misma consideración se aplica para la potencia reactiva variando el valor de b_q .

También, se puede encontrar un modelo ZIP dependiente de la frecuencia [IEEE95]. En concreto, esto se hace agregando dos términos más a la ecuación ZIP estándar (2.1), es decir, si S_{ZIP} es el estimado estándar, entonces el modelo dependiente de la frecuencia viene dado por la ecuación (2.3).

$$S = S_{ZIP} + S_n \cdot \left[c_1 \cdot (V_{(x),p.u})^{b_m} \cdot (1 + d_1 \Delta f) + c_2 \cdot (V_{(x),p.u})^{b_n} \cdot (1 + d_2 \Delta f) \right] \quad (2.3)$$

En este caso la expresión que es añadida corresponde a un termino linealizado dependiente de la frecuencia y los exponentes característicos no tienen un significado físico.

2.3.1.2. Modelos dinámicos

Los modelos dinámicos permiten modelar la carga con cambios repentinos en las señales de tensión y son más usados para realizar análisis de transitorios. Por tal motivo estos modelos sólo pueden ser aplicados para cálculos donde el nivel de tensión no varíe significativamente en un intervalo de tiempo muy pequeño [AGUE06].

A este tipo de modelos le pertenece el modelo ZIPM, el cual es un modelo ZIP estándar al que se le ha agregado un motor de inducción en paralelo para tener en cuenta la dinámica del sistema. La razón es simple, buena parte de algunos tipos de carga en el sistema de distribución son motores de inducción [TAYL08].

Otro tipo de modelo similar a éste último emerge al considerar la carga como un sistema de primer orden cuya variable independiente es la tensión aplicada y su variable dependiente es la potencia activa (reactiva) de la carga [KARL94]. Modelos dinámicos más complejos pueden encontrarse en [HAND96], [MARQ04].

Adicionalmente, a pesar que los modelos dinámicos se comportan bien bajo ciertas condiciones, en análisis de estabilidad se debe incluir el efecto de la red de distribución en serie con el modelo de la carga para obtener una mejor aproximación [IEEE08]. Aún no existe un estudio que muestre el impacto del análogo en los sistemas de distribución, sin embargo, se esperaría que si el tramo de línea que va del ramal a la carga es lo suficientemente grande, éste tenga un impacto en el modelado.

Después de exponer los modelos estáticos y dinámicos de la carga, se debe tener en cuenta que hasta ahora en los estudios de localización de fallas y en la mayoría de los documentos reportados en la literatura especializada, normalmente los métodos de localización no son probados adecuadamente. Lo anterior se da debido a que los autores omiten algunos aspectos importantes como la variación y el modelado de la carga, que causan impactos significativos sobre el desempeño de los localizadores [HERR13a]. También, los modelos de carga usados en la mayoría de las aplicaciones de localización de fallas son de impedancia constante [AGUE06], [SERN10], [IEEE93], [NOVO98], [CHOI04].

Por otro lado, se debe señalar que el ATP/EMTP ofrece claramente una forma de adaptar cargas dependientes de la tensión del circuito, y por tanto es una herramienta útil para realizar el modelado de un sistema de distribución, donde es crucial contar con este tipo de modelos [ATPR11]. Finalmente, en el ATP/EMTP el modelo de la carga implementado hasta ahora es de impedancia constante y se realiza por medio de la representación de una rama RL conectada al nodo de carga. Los valores para las cargas son calculados a partir de datos históricos de curvas de carga promedio, de las señales de tensión y corriente, o también de datos nominales de los transformadores que alimentan a las cargas.

2.3.2. Modelo de la fuente

Las fuentes en los sistemas de distribución son los elementos que entregan alimentación a la red y generalmente representan una subestación (S/E) o un centro de generación distribuida. Así, típicamente los sistemas de distribución comienzan con una subestación de distribución que es alimentada por una o más líneas de sub-transmisión. Cada subestación puede servir a uno o más alimentadores primarios. Estos alimentadores son radiales, lo que significa que sólo hay un camino para que la energía fluya desde la subestación de distribución hasta el usuario [KERS02].

Un diagrama de una subestación de distribución muy sencillo de una línea se muestra en la figura 2.1. Aunque la figura 2.1 muestra un diagrama de subestación simple, ilustra los principales componentes que se encuentran en la mayoría de las subestaciones.

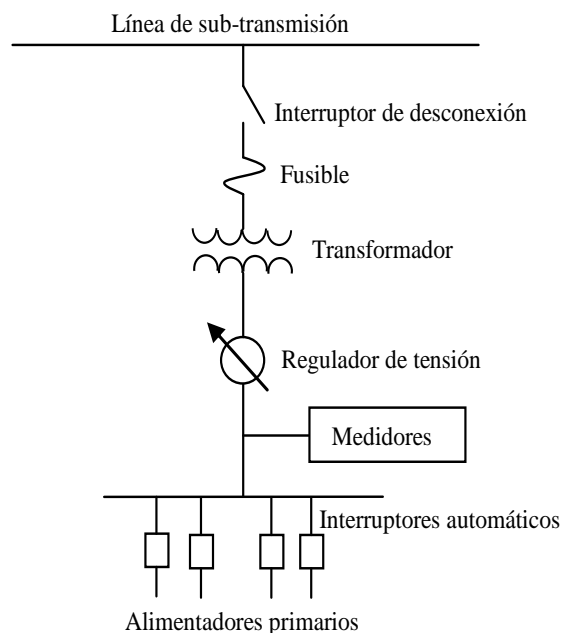


Figura 2. 1. Esquema de una subestación de distribución sencilla

Los elementos presentados en la figura se exponen a continuación [KERS02]:

Conmutación del lado de alta y baja: en la Figura 2.1 la conmutación de alta tensión se realiza con un simple interruptor. Subestaciones más extensas pueden utilizar interruptores de alta tensión en una variedad de diseños de bus de alta tensión. La conmutación de baja tensión en la figura se logra con interruptores de circuito controlados por relés.

Transformación de tensión: la función principal de una subestación de distribución es reducir la tensión al nivel de tensión de distribución.

Regulación de tensión: como la carga de los alimentadores varía, la caída de tensión entre la subestación y el usuario puede variar. Con el fin de mantener tensiones del usuario dentro de un rango aceptable, el voltaje en la subestación necesita cambiar con los cambios de carga.

Protección: la subestación debe estar protegida contra la aparición de cortocircuitos. En el diseño simple de la figura 2.1, la única protección automática contra cortocircuitos en la subestación es por medio de los fusibles del lado de alta en el transformador.

Medición: cada subestación tiene alguna forma de medición. Esto puede ser tan simple como un amperímetro analógico que muestra el valor actual de la corriente de la subestación, así como las corrientes mínimas y máximas que se han producido durante un período de tiempo específico.

Ahora bien, para modelar una fuente en un sistema de distribución es necesario que esta cumpla ciertas características que hagan que se comporte igual a una fuente real. Así, su modelo debe cumplir con las siguientes condiciones [VILLA06]:

- Poseer una potencia fija: Esto se debe a que en la ocurrencia de una falla de cortocircuito, el comportamiento de la fuente será el incremento de la magnitud de corriente y el decrecimiento de la magnitud de la tensión.
- Tener una impedancia interna: En una máquina eléctrica las pérdidas de energía siempre están presentes, por lo que esto se representa con la existencia de una impedancia interna [KUND94]. Esta impedancia interna viene representada por la impedancia de Thevenin del circuito externo conectada a la fuente de alimentación.

Para los estudios donde el interés son las variables eléctricas los modelos detallados de las máquinas no son necesarios ya que las constantes de tiempo eléctricas son mucho más pequeñas que las mecánicas [CARD09].

Adicionalmente, para realizar el modelado de la fuente en un sistema de potencia y teniendo en cuenta que para el propósito de localización de fallas solo se utilizan las medidas de estado estable de las señales de tensión y corriente, es posible tomar un modelo para una fuente en estado estable [KUND94], como el mostrado en la figura 2.2. Donde, E_0

es el voltaje interno de la fuente, Z_{gen} es la impedancia interna de la fuente (Impedancia de Thevenin) y V_s es la tensión de entrega por la fuente.

Así es posible representar el circuito de la figura 2.1 como una fuente de excitación en serie con una impedancia interna, que en este caso equivale a la impedancia de Thevenin del circuito externo.

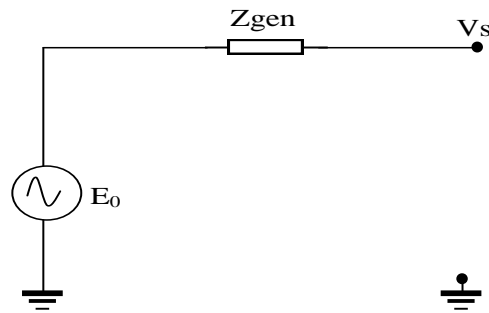


Figura 2. 2. Modelo para una fuente en estado estable

Finalmente, el programa ATP/EMTP permite la representación de fuentes de excitación, de tensión o de corriente que están definidas analíticamente dentro del programa.

Estas fuentes por si solas tienen un comportamiento ideal, es decir que si se requiere un modelo de la de fuente se debe agregar el correspondiente equivalente de impedancia de Thevenin o Norton según sea fuente de tensión o de corriente [VILLA06]. Las fuentes básicas de excitación son las que aparecen en la Figura 2.3.

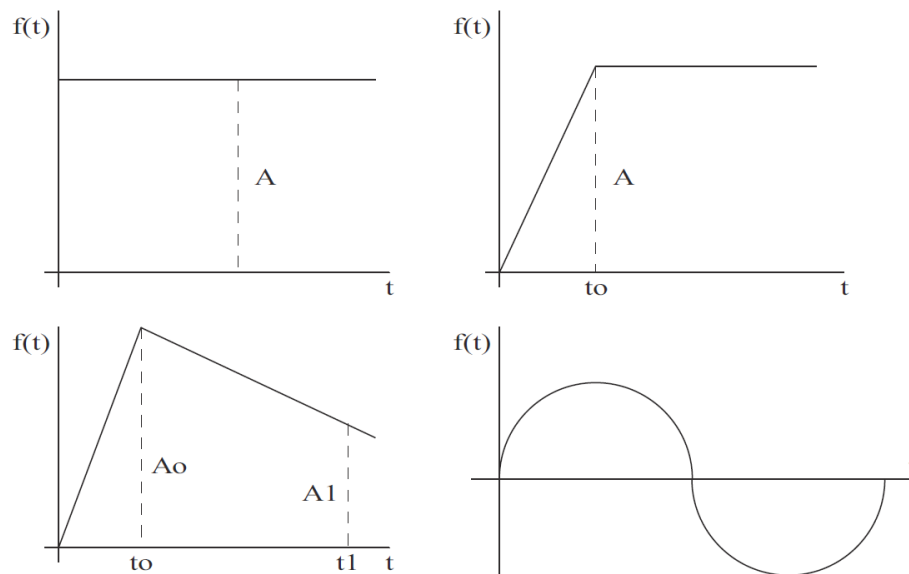


Figura 2. 3. Formas de ondas básicas de voltaje y corriente de excitación.

En la Figura 2.4 se observa el grupo de fuentes de excitación disponibles en el ATP y en el Atpdraw.

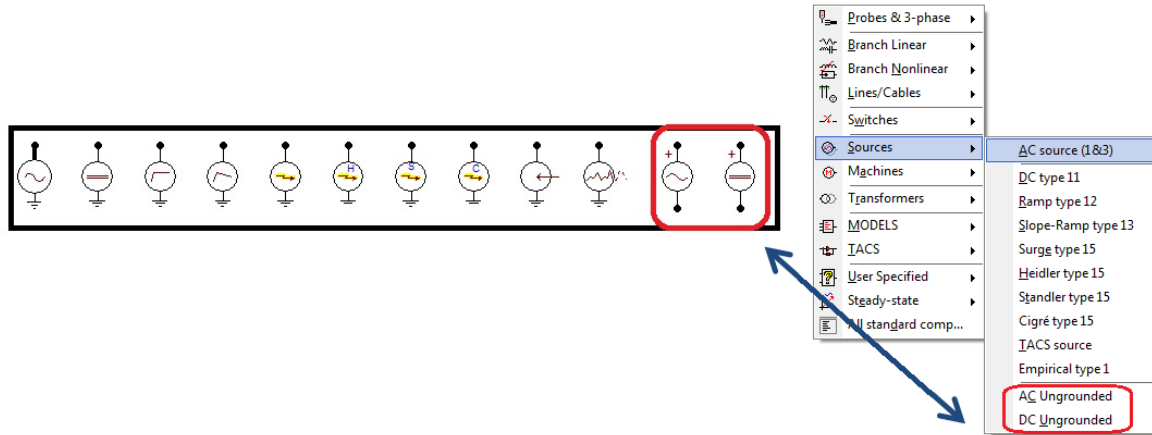


Figura 2. 4. Menú de fuentes en ATP y ATPDraw.

Las fuentes por definición se conectan entre la tierra y un nodo. Las dos últimas fuentes de la Figura 2.4 corresponden a las que se pueden conectar entre dos nodos de la red.

2.3.3. Modelo de las líneas

El modelado de líneas de distribución, aéreas y subterráneas es un paso crítico en el análisis de sistemas de distribución. Es importante incluir la secuencia de la línea y el espaciamiento entre los conductores [KERS02]. Lo anterior, hace que un ingreso inadecuado de los datos afecte negativamente el desempeño de los localizadores.

2.3.3.1. Modelo exacto de segmento de línea

El modelo exacto de un segmento de línea aérea o subterránea ya sea trifásico, bifásico o monofásico es mostrado en la figura 2.5.

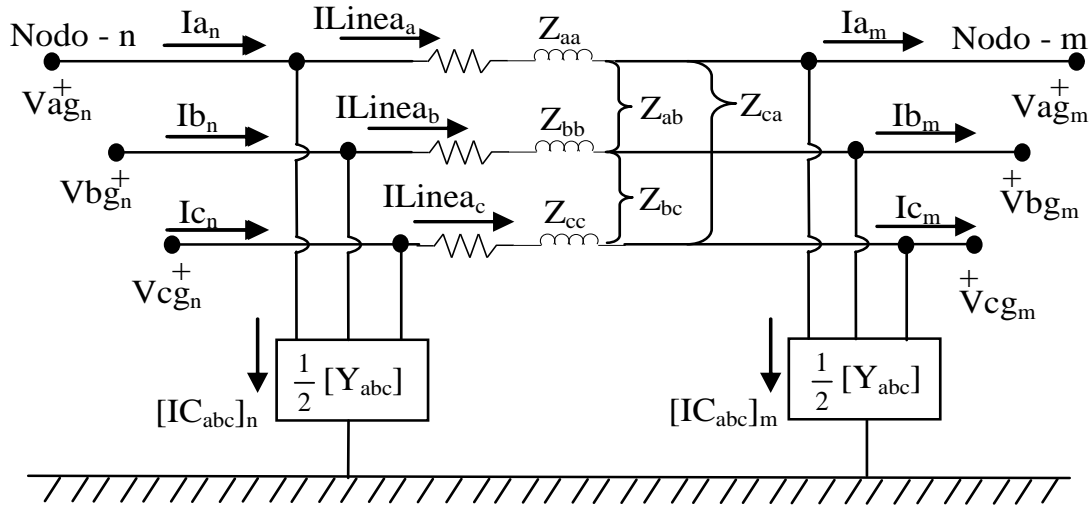


Figura 2. 5. Modelo exacto de línea trifásica

Cuando el segmento de línea es bifásico o monofásico, algunos valores de la matriz de impedancia y de admitancia se vuelven cero [KERS02].

Para el segmento de línea de la figura 2.5, las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes a la entrada (*nodo n*), con las tensiones y corrientes a la salida (*nodo m*) son desarrolladas como sigue:

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff para el *nodo m*:

$$\begin{bmatrix} ILinea_a \\ ILinea_b \\ ILinea_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m \quad (2.4)$$

En forma condensada la ecuación (2.4) se convierte en:

$$[ILinea_{abc}] = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_m \quad (2.5)$$

Ahora bien, aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al modelo dado:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ILinea_a \\ ILinea_b \\ ILinea_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

En forma condensada la ecuación (2.6) se convierte en:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] [ILinea_{abc}] \quad (2.7)$$

Sustituyendo la ecuación (2.5) en la ecuación (2.7):

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \left\{ [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_m \right\} \quad (2.8)$$

Agrupando términos:

$$[VLG_{abc}]_n = \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] [I_{abc}]_m \quad (2.9)$$

Donde

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La forma general de la ecuación (2.9) es:

$$[VLG_{abc}]_n = [a] [VLG_{abc}]_m + [b] [I_{abc}]_m \quad (2.11)$$

Donde
$$[a] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (2.12)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (2.13)$$

Ahora, la corriente de entrada al segmento de línea para el *nodo n* es:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} ILinea_a \\ ILinea_b \\ ILinea_c \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n \quad (2.14)$$

En forma condensada la ecuación (2.14) se convierte en:

$$[I_{abc}]_n = [ILinea_{abc}] + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_n \quad (2.15)$$

Sustituyendo la ecuación (2.5) en la ecuación (2.15):

$$[I_{abc}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_m + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_n \quad (2.16)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (2.9) en la ecuación (2.16):

$$\begin{aligned} [I_{abc}]_n &= [I_{abc}]_m + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_m + \dots \\ &\dots + \frac{1}{2}[Y_{abc}] \left(\left\{ [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \right\} [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}][I_{abc}]_m \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Agrupando términos en la ecuación (2.17):

$$\begin{aligned} [I_{abc}]_n &= \left\{ [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}][Y_{abc}] \right\} [VLG_{abc}]_m + \dots \\ &\dots + \left\{ [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \right\} [I_{abc}]_m \end{aligned} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) es de la forma:

$$[I_{abc}]_n = [c][VLG_{abc}]_m + [d][I_{abc}]_m \quad (2.19)$$

Donde
$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (2.20)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (2.21)$$

Las ecuaciones (2.11) y (2.19) se puede poner en forma de matriz particionada:

$$\begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_n \\ [I_{abc}]_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [VLG_{abc}]_m \\ [I_{abc}]_m \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La ecuación (2.22) es muy similar a la ecuación utilizada en análisis de líneas de transmisión cuando los parámetros $ABCD$ han sido definidos. En este caso, los parámetros $abcd$ son matrices 3×3 en lugar de variables individuales.

El anterior, es el modelo exacto para las líneas de transmisión. Por otro lado, se puede demostrar que la admitancia shunt del modelo exacto en la figura 2.5 es muy pequeña y puede ser despreciada, así se puede obtener un modelo de línea modificado en donde la admitancia shunt no es considerada, y a partir de un análisis de las ecuaciones anteriores se pueden obtener las nuevas ecuaciones del modelo. Adicionalmente, puede ocurrir que solo se posean datos de la impedancia de secuencia positiva y cero; en este caso se puede desarrollar un modelo de línea aproximado a partir de estos datos [KERT02].

Finalmente, los modelos de líneas se encuentran muy bien definidos en el software ATP/EMTP, el cual posee modelos variados de línea, dependiendo de los datos que se posean y el tipo de aplicación que se desee realizar [ATPR11], [HORP02], [EMTP94].

2.3.3.2. Alternativas de modelo de líneas en el ATP/EMTP

En la figura 2.6 se muestra los modelos de líneas que posee el ATP/EMTP.

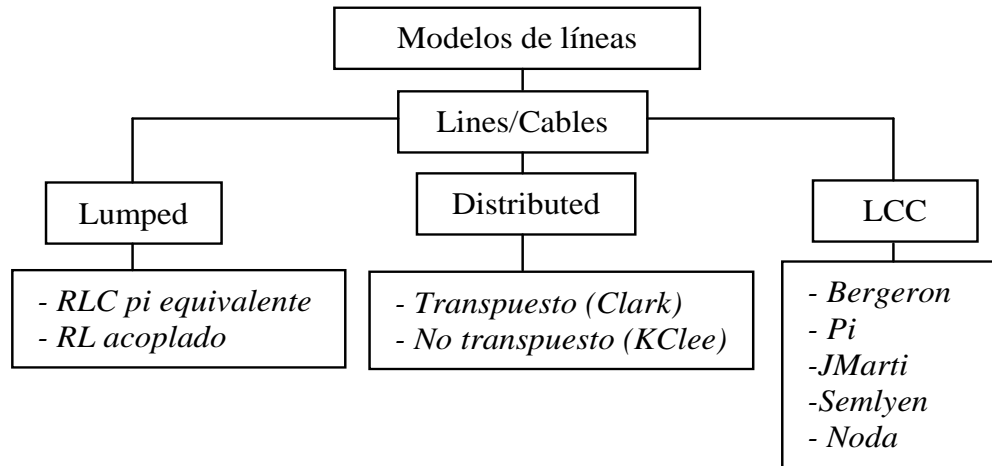


Figura 2. 6. Modelos de líneas disponibles en el ATPDraw

Según se observa en la figura 2.6, los modelos de líneas disponibles en el ATPDraw se pueden dividir en 3 grupos fundamentales: modelos de líneas con parámetros concentrados, modelos de líneas de onda viajera con parámetros distribuidos y modelos de líneas aéreas LCC con parámetros distribuidos.

a. Modelos de líneas con parámetros concentrados

- *Modelo de línea RLC pi equivalente*

El modelo *pi* es usado para modelar líneas cortas en estado estacionario, a la frecuencia de la red [REST08]. Tiene en cuenta tanto el efecto capacitivo de las líneas como el acople entre cada una de las fases, permitiendo así representar circuitos de tipo monofásicos, bifásicos y trifásicos.

- *Modelo de línea RL acoplado*

Este modelo conserva las características del modelo *pi*, con la diferencia que no toma en cuenta los efectos derivados de la capacitancia shunt. Así, en el modelo se eliminan todas las variables que correspondan a este valor [ATPR11], [EMTP94].

En las figura 2.7 y 2.8, se presentan el modelo *pi equivalente* y el modelo RL *acoplado* respectivamente, con la ruta para ser obtenidos mediante el ATPDraw.

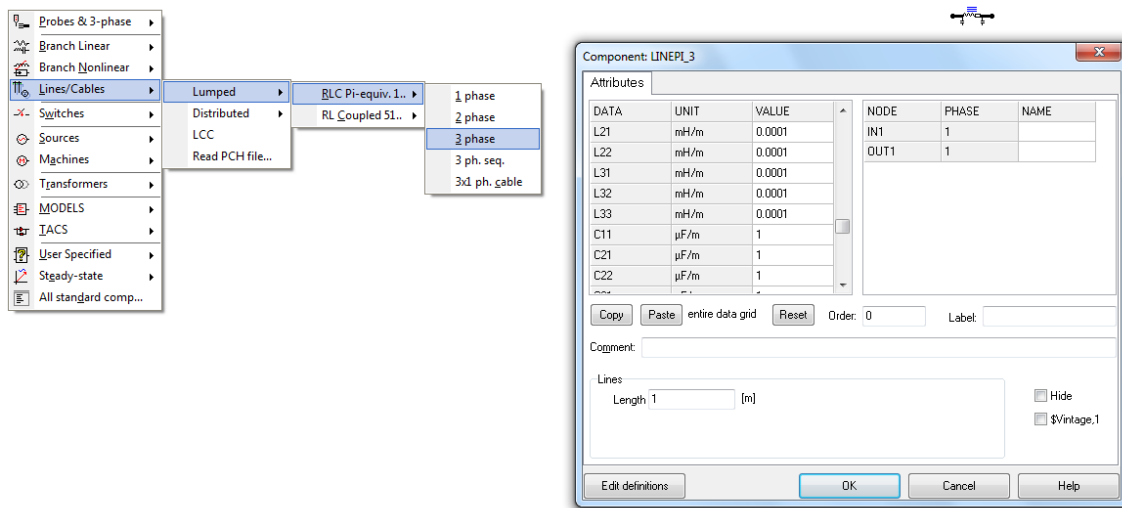


Figura 2. 7. Modelo RLC *pi* equivalente

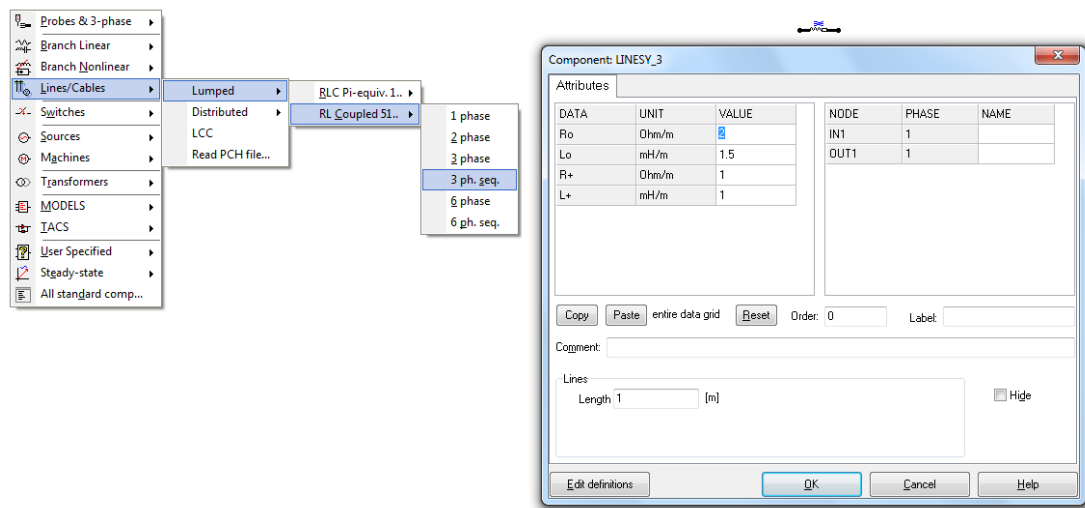


Figura 2. 8. Modelo RL *pi* acoplado

b. Modelos de líneas de onda viajera con parámetros distribuidos

En estos modelos de línea con parámetros distribuidos aparecen dos modelos, cuya diferencia para su implementación radica en la condición de transpuesta de la línea.

Estos modelos se basan en la propagación de las ondas en una línea de transmisión, con parámetros L' y C' constantes y distribuidos a lo largo de ésta. Para líneas multifases, se hace una descomposición modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. La descomposición modal se realiza mediante la matriz de transformación [ATPR11], [EMTP94].

- *Modelo de Clarke para líneas transpuestas*

El modelo de *Clarke* aprovecha la condición de línea transpuesta, de tal manera que los parámetros de cada uno de los modos de propagación se obtengan a partir de las componentes de secuencia, dando la característica de constante a la matriz de transformación.

- *Modelo de Kclee para líneas no transpuestas*

Dado que la línea no es transpuesta, en el modelo de *Kclee* se utiliza una matriz de transformación particular, por cada modo a evaluar, debido a que la matriz de transformación varía con la frecuencia [REST08], [HEVI99].

La figura 2.9 muestra la ruta para obtener cada uno de estos modelos en el *ATPDraw*.

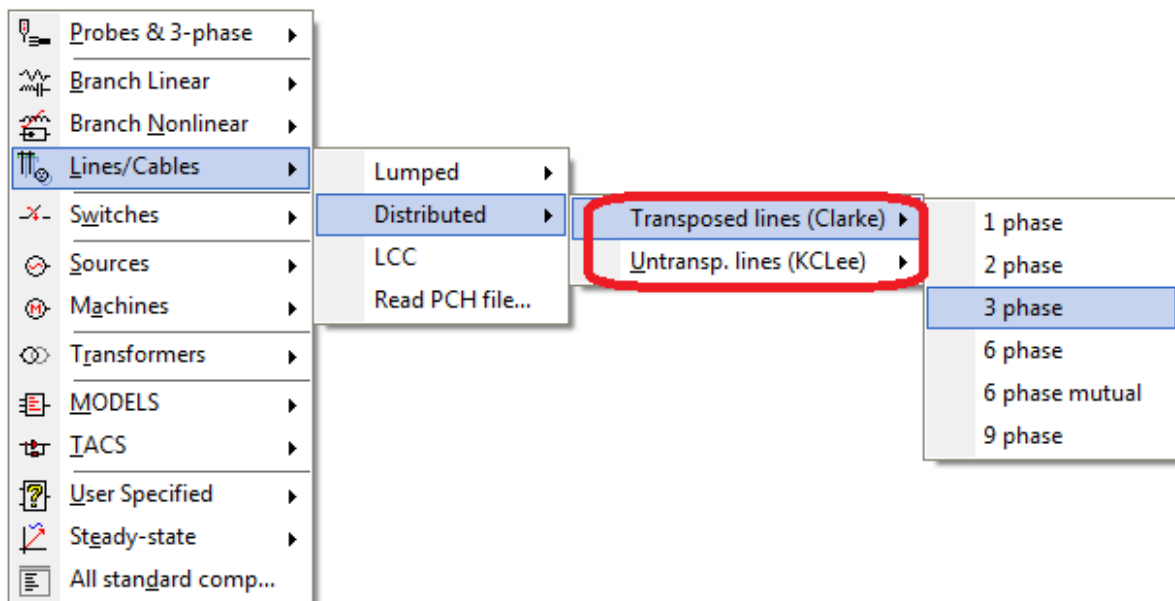


Figura 2. 9. Modelos de línea con parámetros distribuidos del ATPDraw

c. Modelos de líneas aéreas LCC, con parámetros distribuidos

El bloque de líneas aéreas *LCC*, contiene 5 tipos de modelos de líneas, los cuales presentan diferentes características, según las necesidades de modelado que se requieren y los datos con los que se cuente [HEVI99], [ATPR11]. Estos se pueden obtener siguiendo la ruta *Lines/Cables* del *ATPDraw*. La figura 2.10 muestra los modelos disponibles y la ruta a seguir.

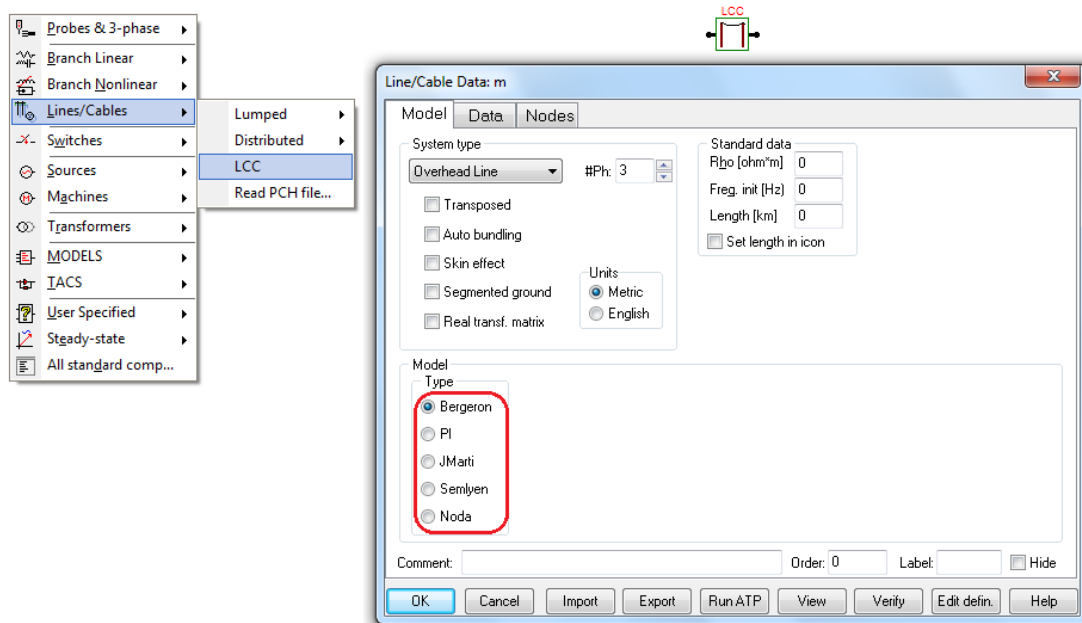


Figura 2. 10. Modelos de línea LCC

A continuación se enuncia brevemente las características de cada uno de los modelos disponibles en *LCC*, según se observa en la figura 2.10.

- *Modelo Bergeron*

Este modelo conserva las características de operación del *Clarke* y *Kclee*, el cual se basa en la propagación de las ondas en una línea de transmisión, con parámetros L' y C' constantes y distribuido a lo largo de ésta. Para líneas multifases, se hace una descomposición modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. La descomposición modal se realiza mediante la matriz de transformación, la cual es exacta para líneas transpuestas balanceadas. Si la línea es no transpuesta y desbalanceada, la matriz de transformación varía con la frecuencia, por tanto se pierde su condición de constante y no sería útil su uso [REST08], [HEVI99].

- *Modelo pi*

Este modelo es adecuado para aplicar a modelos de líneas cortas, donde se simulan fenómenos estacionarios a frecuencia de la red [REST08], [ATPR11].

- *Modelo Jmarti*

Es un modelo de línea dependiente de la frecuencia. Al igual que el modelo *Bergeron*, *Jmarti* utiliza matrices de transformación modal constantes, presentando problemas de exactitud para líneas desbalanceadas no transpuestas. Adicionalmente, realiza una aproximación de la impedancia característica y la constante de propagación mediante funciones racionales, lo que afecta su precisión en los casos de bajas frecuencias o líneas cortas [MART82], [ATPR11].

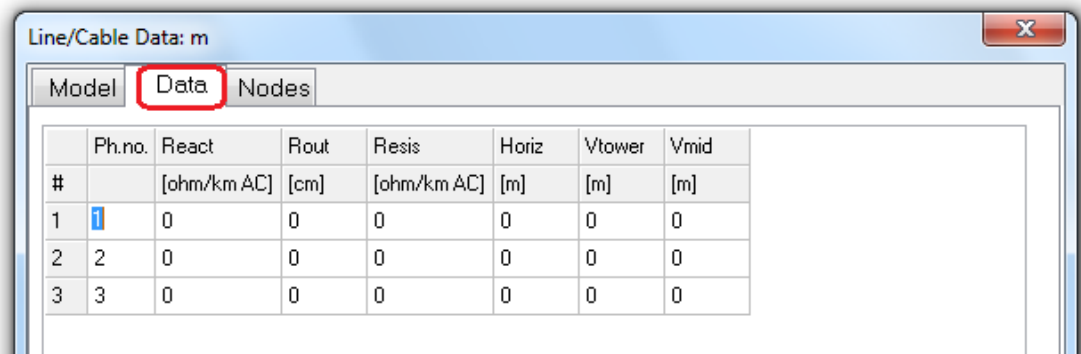
- *Modelo Semlyen*

Este modelo aproxima la impedancia característica y la constante de propagación de cada modo mediante dos exponenciales. Esta aproximación en muchos casos es imprecisa, haciendo de éste un modelo en desuso [HEVI99], [SEML75].

- *Modelo Noda*

El modelo de *Noda* se desarrolla en el dominio de fases, evitando los problemas asociados a la matriz de transformación modal constante. Además de esto, toma en cuenta la dependencia de los parámetros de la línea con la frecuencia. Debido a la aproximación de la admitancia característica y la matriz de propagación que se realiza en el modelo, éste presenta una fuerte dependencia del paso del tiempo, convirtiéndolo en un método inexacto al aplicarse un paso de tiempo arbitrario [NODA96], [NODA05].

Todos los modelos presentados y que se pueden obtener a partir del bloque de simulación *LCC*, requieren para su implementación en *ATPDraw*, los parámetros eléctricos de los conductores y los parámetros de distribución geométrica de las estructuras que los contienen, según se presenta en la figura 2.11.



#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0

Figura 2. 11. Datos de parámetros eléctricos y de distribución geométrica para simulación con LCC

También los modelos requieren de una información estándar, común para todos los modelos como se muestra en el cuadro punteado en la figura 2.12. Adicionalmente, y dependiendo de la naturaleza de la línea a modelar (líneas aéreas generales, cables

compactos o líneas por ductos), el usuario puede seleccionar las características a tener en cuenta para cada situación, esto se presenta en el cuadro solido de la misma figura.

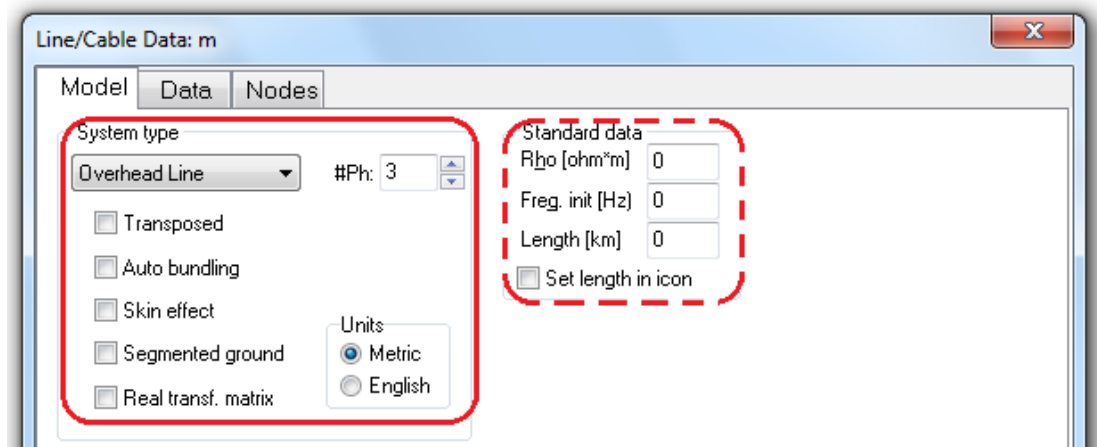


Figura 2. 12. Datos de características adicionales, según naturaleza de la línea

2.3.4. Modelo de los transformadores

El transformador es un componente clave en todos los sistemas de energía. Así, bancos de transformadores trifásicos pueden ser encontrados en subestaciones de distribución, donde los voltajes son transformados desde un nivel de tensión de transmisión o sub-transmisión a niveles de alimentación de distribución. En la mayoría de los casos los transformadores de una subestación son unidades trifásicas. Para un alimentador de cuatro hilos en estrella, la conexión más común del transformador de la subestación es delta-estrella aterrizado (Δ - Y_g). Un alimentador trifásico en delta, típicamente tendrá un transformador delta-delta conectado en la subestación. Bancos de transformadores trifásicos fuera de la alimentación van a proveer la transformación de tensión final a la carga del usuario. Se puede aplicar una variedad de conexiones del transformador, dependiendo del tipo de alimentación que se desee entregar al usuario final y de la carga conectada [KERT02].

Adicionalmente, al igual que en el modelo de las líneas, el modelo de los transformadores está bien definido en el ATP/EMTP, pudiendo modelar desde transformadores ideales, hasta transformadores *Saturable* o *BCTRAN*, ya sean monofásicos, bifásicos o trifásicos. Los transformadores ideales solo requieren la relación de transformación para ser representados, los transformadores saturables requieren, además de la relación de transformación entre espiras, los parámetros de impedancia tanto en el primario como en el secundario, grupo de conexión, ángulo de desfase y la resistencia de la rama de magnetización [ATPR11], [DUTA10]. Adicionalmente, hay transformadores híbridos (XFMR), y en estos el usuario puede basar el modelo del transformador en tres fuentes de datos: Diseño (especificar parámetros de la geometría y el material del núcleo y devanados), Informe de la prueba (similar a BCTRAN excepto para el modelo básico), y típica (valores típicos basados en el voltaje y la potencia) [HORP09], [DUTA10].

Los modelos de transformadores más usados en el ATP/EMTP son Saturable, BCTRAN y XFMR (Modelo híbrido). El modelado del núcleo del transformador en el programa ATP/EMTP para los transformadores saturable y BCTRAN se basa en la curva característica flujo-corriente (λ_{pico} vs. I_{pico}), que es obtenida a partir de los datos de Voltaje *rms* y Corriente *rms* de la prueba de vacío mediante la rutina *SATURA*, la cual, realiza una extrapolación lineal de los dos últimos puntos de datos de dicha prueba considerando constante la inclinación del segmento formado por dichos puntos. Por otro lado, el modelo híbrido toma el modelo BCTRAN y tiene varias mejoras [DUTA10].

- *Modelo saturable*

Este modelo presenta en su entrada de datos una tabla en la cual se ingresan los valores de V_{rms} e I_{rms} de la prueba de vacío. Al momento de ejecutar el programa ATP/EMTP, esta tabla de valores es convertida a λ_{pico} vs. I_{pico} mediante la subrutina *SATURA* y el núcleo así representado es conectado en el primario del transformador. Este modelo considera a sus elementos como desacoplados. La figura 2.13 muestra la ruta de acceso del ATPDraw y la ventana de datos para dicho transformador.

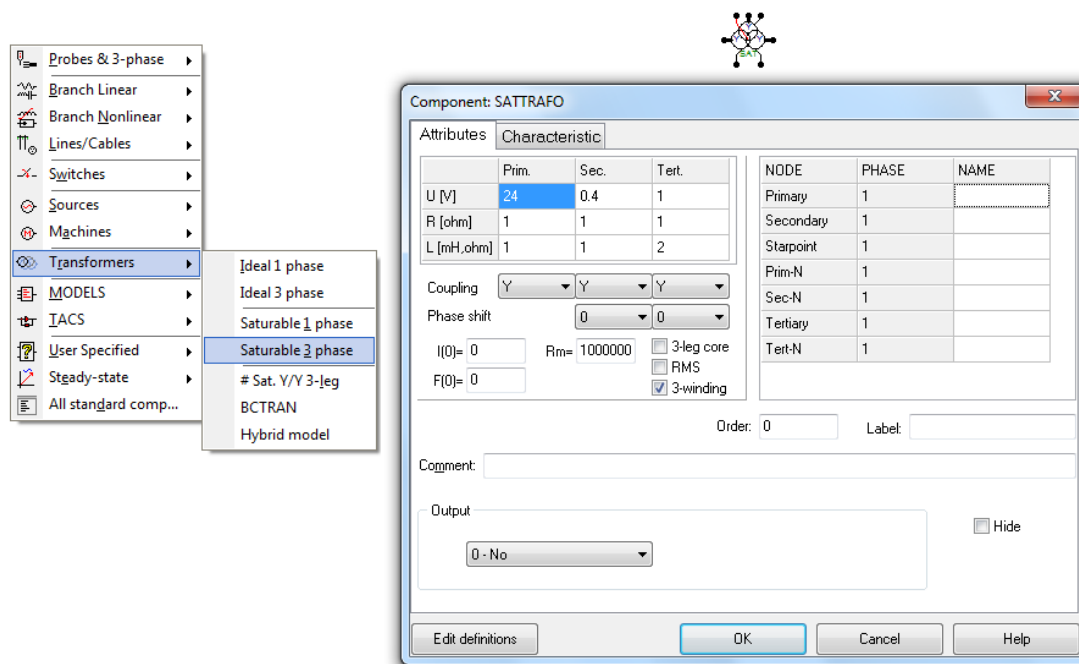


Figura 2. 13. Modelo de transformador saturable

En la figura anterior, en la pestaña “Characteristic”, se deben ingresar los datos de la curva de vacío y así por medio de la rutina *SATURA*, el transformador calcula la curva de saturación.

- *Modelo BCTRAN*

El modelo *Saturable* presenta limitaciones al momento de modelar transformadores trifásicos, por tal motivo se desarrolló el modelo *BCTRAN* el cual es una representación lineal simplificada de transformadores monofásicos o trifásicos en la forma de matrices de impedancias ó admitancias de rama (matriz L ó $A=L^{-1}$) tomando en cuenta los acoplamientos mutuos. Sin embargo, esta aproximación no puede incluir topologías multiramas o efectos no lineales del núcleo [DUTA10], [ATPR11]. La figura 2.14 muestra la ruta de acceso del ATPDraw y la ventana de datos para este modelo.

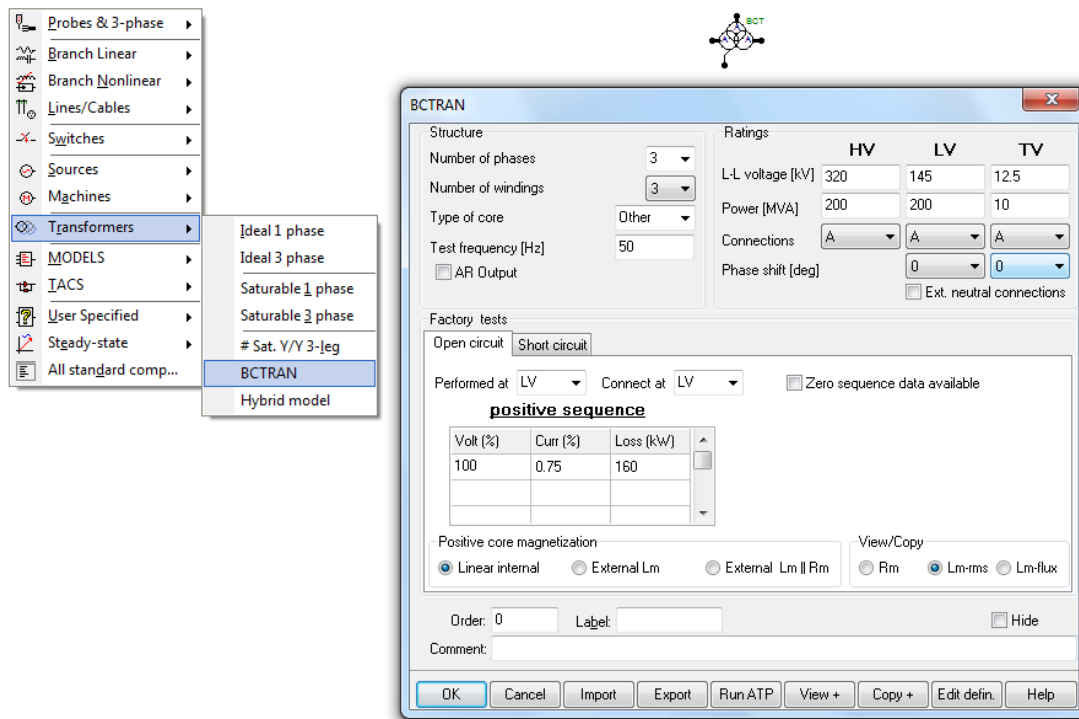


Figura 2. 14. Modelo de transformador BCTRAN

Como muestra la figura anterior se pueden ingresar los valores de los datos de las pruebas en el transformador, como son los datos de prueba de vacío o circuito abierto y los datos de corto circuito; tanto de secuencia positiva como de secuencia cero, si estos últimos están disponibles.

- *Modelo XFMR (Modelo híbrido)*

Finalmente, el modelo XFMR (Modelo híbrido), como se dijo previamente, toma las características del modelo BCTRAN y presenta algunas mejoras, donde el usuario puede basar el modelo del transformador en tres fuentes de datos: Diseño, informe de la prueba y valores típicos [DUTA10], [HORP09].

La figura 2.15 muestra la ruta de acceso del ATPDraw y la ventana de datos para este modelo. En el recuadro solido de la figura se muestran las tres fuentes de datos en las cuales se puede basar el modelo. Si se poseen valores de secuencia cero disponibles, se

puede activar esta función para incluirlos seleccionando al lado derecho de los reportes de datos.

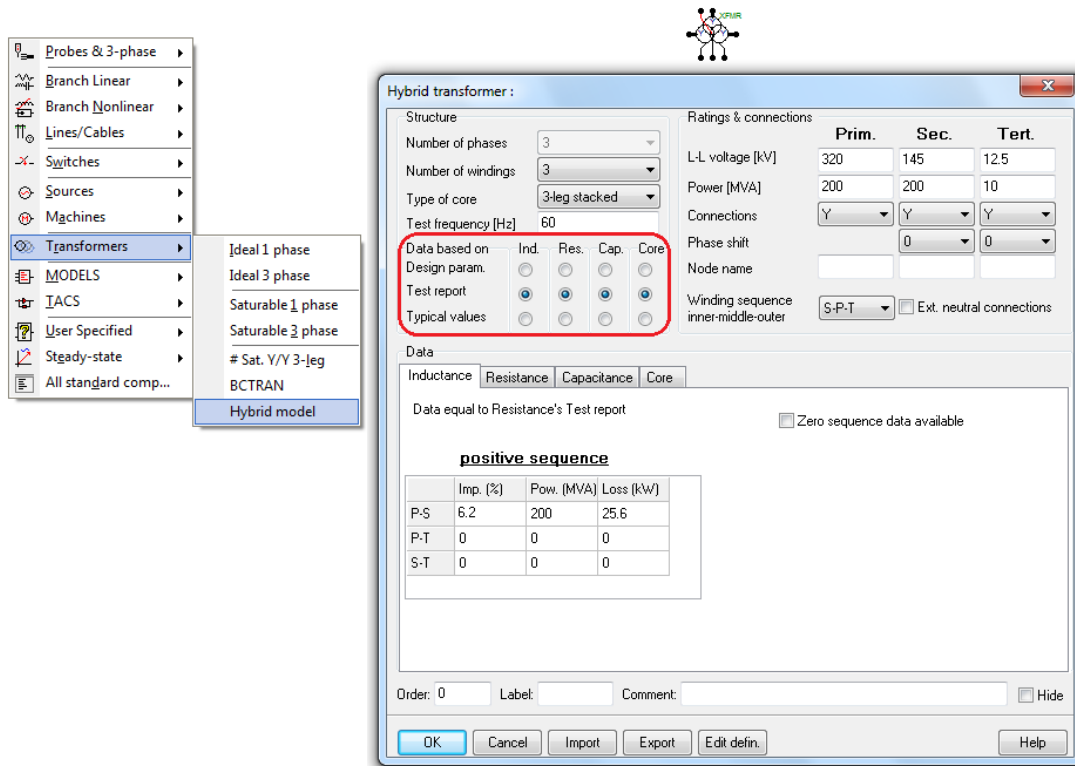


Figura 2. 15. Modelo de transformador híbrido (XFMR)

2.4.Generalidades de la localización de fallas en sistemas de distribución

La localización de fallas tiene que ver con encontrar la ubicación de una falla que ha ocurrido en el sistema; ésto teniendo en cuenta los diferentes aspectos que influyen en la localización de la misma. Hay dos tipos de fallas que experimentan los sistemas de potencia, que son las fallas serie y paralelas [ANDE95]. Las fallas serie están asociadas generalmente a la ruptura de conductores, pero éstas no involucran contacto con tierra u otra fase. Las fallas paralelas están asociadas a cortocircuitos a tierra o con otras fases y este grupo se subdivide en cinco tipos: a) Monofásicas, b) Bifásicas, c) Bifásicas a tierra, d) Trifásicas y e) Trifásicas a tierra [MORA06a]. Los métodos comúnmente utilizados para la localización en líneas aéreas, hacen referencia a las fallas de tipo paralela, dadas sus altas tasas de ocurrencia [CROZ99]. Las fallas tipo serie o de alta impedancia están fuera del alcance de este proyecto.

Estudios han determinado que aproximadamente el 80% del total de fallas en el sistema de potencia, corresponden a fallas en el sistema de distribución [BOLL93]. Del total de fallas en sistemas de distribución, aproximadamente el 70% corresponde a fallas monofásicas a tierra [MORA06a].

Como se mencionó anteriormente, existen variedad de metodologías propuestas para realizar la localización de la falla en sistemas de distribución, una de ellas son los métodos basados en el modelo (MBM); estos métodos a partir de las medidas de tensión y corriente antes y durante la falla en un extremo de la línea, en este caso la subestación y realizando un análisis circuital del sistema, permiten ubicar la falla. Además, son los más usados por su facilidad de implementación y exactitud; aunque presentan problemas de múltiple estimación cuando el circuito es altamente ramificado [DAS98], [NOVO98]. Por otro lado están los métodos basados en el conocimiento (MBC); este tipo de métodos usan información de los registros de falla del sistema en tensiones y corrientes para realizar una clasificación de la falla presentada, dividiendo el sistema en determinadas zonas y ubicando la falla en una de estas zonas. A continuación se expone la teoría básica de dos métodos de localización de fallas, un MBM y un MBC, los cuales serán usados en el desarrollo de este trabajo. Explicaciones mas detalladas son encontradas en las referencias.

2.5. Método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM)

Este método es propuesto en [NOVO98], y se sugiere principalmente para líneas de transmisión cortas, pudiéndose extender a sistemas de distribución. La técnica se basa en simplificar un sistema de distribución concentrando las cargas al final del circuito. Esta aproximación es posible debido a que en los sistemas de distribución, la impedancia de carga es normalmente mucho mayor que la de línea, lo cual no causa errores considerables en el método.

A partir de la aproximación anterior, se puede obtener un esquema simplificado del cual se obtiene una ecuación compleja, en términos de la distancia, la corriente y la resistencia de falla, que considera las variaciones de tensión y corriente en pre-falla y falla de estado estable. De dicha ecuación se puede obtener una relación cuadrática en términos de la distancia de falla m , cuya solución se obtiene de separar las partes real e imaginaria.

El tipo de falla es considerado con una adecuada selección de las corrientes y tensiones dentro del cálculo. Para una mayor exactitud en la localización, el método puede incluir un factor de compensación debido a las cargas distribuidas. Pese a que la técnica no tiene en cuenta, de manera clara, los desbalances de carga en el sistema, resulta atractiva debido a su sencillez y buenos resultados reportados en simulación [CORR12].

Para realizar el planteamiento de este método se parte de los circuitos de pre-falla y falla de la figuras 2.16 y 2.17 respectivamente. Así, los cambios inducidos por la falla en el sistema (Figura 2.17), superpuestos sobre las condiciones de pre-falla (Figura 2.16), se pueden representar por medio de un circuito equivalente el cual se muestra en la Figura 2.18.

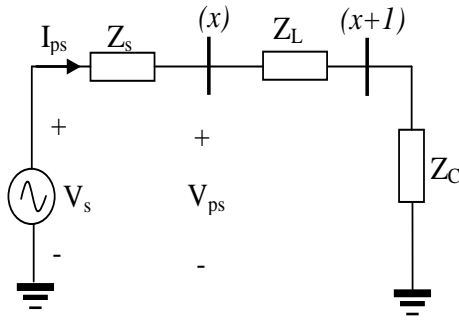


Figura 2. 16. Circuito equivalente en estado de pre-falla

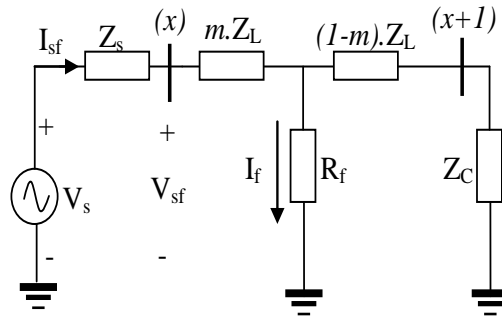


Figura 2. 17. Circuito equivalente en estado de falla

En los circuitos anteriores se define, V_{ps} e I_{ps} como la tensión y la corriente en pre-falla, equivalente para el circuito unifilar; Z_s la impedancia de la fuente; Z_L impedancia de la línea que une los nodos (x) y $(x+1)$ y finalmente Z_C que constituye la impedancia de la carga acumulada en el nodo $(x+1)$. V_{sf} e I_{sf} son la tensión y la corriente en falla equivalente para el circuito, m es la distancia a la falla en p.u y R_f es la resistencia de falla [CORR12].

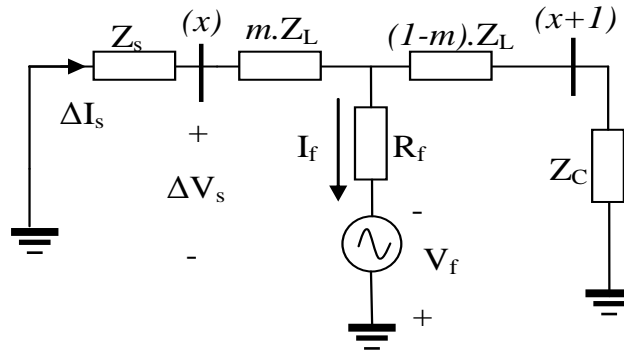


Figura 2. 18. Circuito equivalente superpuesto

Ahora bien, el método se fundamenta en el cálculo de la impedancia de falla vista desde ambos extremos de la línea, basado en la información de tensión y corriente en estado estable de pre-falla y falla medidas en la subestación. Así, de la Figura 2.16 se obtiene la impedancia de carga como:

$$Z_C = \frac{V_{ps}}{I_{ps}} - Z_L \quad (2.23)$$

De la figura 2.17 se obtiene la impedancia medida desde la subestación y con la información del modelo se encuentra que es una ecuación con tres incógnitas (m , R_f e I_f).

$$Z_{MED} = \frac{V_{sf}}{I_{sf}} = m \cdot Z_L + R_f \cdot \frac{I_f}{I_{sf}} \quad (2.24)$$

Ahora, en el esquema de la Figura 2.18, la impedancia vista desde la fuente está dada por la ecuación (2.25).

$$Z_s = -\frac{\Delta V_s}{\Delta I_s} \quad (2.25)$$

Donde:

$$\Delta V_s = V_{sf} - V_{ps} \quad (2.26)$$

$$\Delta I_s = I_{sf} - I_{ps} \quad (2.27)$$

A partir de un análisis circuital del modelo superpuesto (Figura 2.18), analizando las dos mallas del circuito y al despejar I_f , se obtiene la ecuación (2.28) [CORR12].

$$I_f = \Delta I_s \cdot \left(\frac{Z_C + Z_s + Z_L}{Z_C + (1 - m) \cdot Z_L} \right) \quad (2.28)$$

Remplazando la ecuación (2.28) en la ecuación (2.24), se obtiene la ecuación compleja (2.29).

$$V_{sf} = m \cdot Z_L \cdot I_{sf} + R_f \cdot \Delta I_s \cdot \left(\frac{Z_C + Z_s + Z_L}{Z_C + (1 - m) \cdot Z_L} \right) \quad (2.29)$$

De la ecuación compleja anterior con incógnitas m y R_f , se puede obtener la relación cuadrática mostrada en la ecuación (2.30).

$$m^2 + m \cdot K_1 + K_2 - K_3 \cdot R_f = 0 \quad (2.30)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{V_{sf}}{Z_L \cdot I_{sf}} + \frac{Z_C}{Z_L} + 1 \quad (2.31)$$

$$K_2 = \frac{V_{sf}}{Z_L \cdot I_{sf}} \cdot \left(\frac{Z_C}{Z_L} + 1 \right) \quad (2.32)$$

$$K_3 = \frac{\Delta I_s}{Z_L \cdot I_{sf}} \cdot \left(\frac{Z_C + Z_s}{Z_L} + 1 \right) \quad (2.33)$$

La solución de la ecuación cuadrática se obtiene separando las partes real e imaginaria. Así, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con incógnitas m y R_f se resuelve y se encuentra la resistencia y distancia de estimación de la falla respectivamente [NOVO98], [CORR12].

Finalmente, para realizar la búsqueda de la sección en falla se tiene que inicialmente el sistema se divide en alimentadores equivalentes o radiales equivalentes y a la vez cada uno de éstos se dividen en secciones, el objetivo es encontrar la distancia desde la subestación

hasta el punto de falla en un alimentador equivalente en particular. El alimentador equivalente está dividido en varias secciones, lo que genera que se pueda aplicar el método en cada sección y seguir avanzando según el comportamiento de la distancia estimada. La condición que se debe cumplir para definir la sección fallada, es que la distancia estimada en esta sección no debe superar el valor de 1, si se supera este valor el método indica que la falla se encuentra más allá de esa sección o tramo [CORR12].

2.6. Método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)

Este tipo de métodos son aplicados generalmente para localizar zonas de falla y su principal objetivo es reducir el efecto de la múltiple estimación. Éste es uno de los problemas comunes que se presentan cuando se localizan fallas por medio de técnicas que usan mediciones en un sólo terminal de la línea, tales como los MBM.

En general, los métodos de localización de fallas basados en el conocimiento (MBC), se fundamentan en el análisis de un conjunto de características obtenidas de la componente fundamental de la señal y la corriente medidas en la subestación. Estas características se asocian a una serie de eventos de fallas ocurridos en una zona determinada del circuito [MORA06a].

Este tipo de métodos consideran una gran cantidad de variables para llevar a cabo su objetivo, lo que convierte su implementación en una tarea de difícil manejo, no solamente por la cantidad de información sino por la redundancia que puede existir entre ella. Para menguar esta dificultad, se realiza un tratamiento previo de las variables, para establecer un conjunto de menor dimensión y que proporcione la mayor información del comportamiento del circuito [PERE07]. Existen diversas técnicas encaminadas a localizar la zona de falla, pero en general centran su esfuerzo en obtener aquellas variables que describan totalmente el comportamiento del sistema bajo falla, de tal forma que se pueda asociar dicho comportamiento a un evento determinado en una zona específica del circuito. Esta asociación se realiza por medio de reglas difusas, que en cierta forma son las que dan origen a los algoritmos de localización.

La implementación de estos métodos no acarrea alta inversión, pero demanda un nivel alto de programación y un conocimiento pleno del sistema. A continuación se expone una técnica para localizar fallas, a través de las máquinas de soporte vectorial, SVM por sus siglas en inglés Support Vector Machines, que basa su implementación y desarrollo en el conocimiento del sistema [MORA06a], [CORR12], [GIL11].

Ahora bien, la SVM como algoritmo de aprendizaje (*“learning machine”*), se basa en procedimientos de estimación de parámetros a partir de un conjunto de datos (*“Training”*), el cálculo del valor de la función (*“Testing”*), y la evaluación de la precisión

(“*Performance*”). La SVM toma como entrada un conjunto de datos o vector de entradas (descriptores de fallas en una base de datos) cada uno asociado a un valor de salida (distancia a la falla desde la subestación) y retorna una función de regresión que permite estimar con cierto error de estimación, el valor que le corresponde a un nuevo dato. La función utilizada para medir el error se llama función de pérdida y si para un mismo conjunto de datos se utilizan distintas funciones de pérdida se obtienen distintas funciones de regresión [CORR12].

Referente a la arquitectura de las SVM, esta sólo depende de un parámetro de penalización denotado como C y la función *kernel* (incluyendo sus parámetros). En el caso de la Función Base Radial (RBF), existe sólo un parámetro denotado como σ [BURG98], [MORA06a], [GIL11].

2.6.1. Fundamentación teórica del método

Considérense n datos de entrenamiento N dimensionales (\vec{x}_i), con su respectiva etiqueta (y_i), tal como se muestra en la ecuación (2.34).

$$x_i \in \mathcal{R}^N \text{ y } y_i \in \{+1, -1\} \quad (2.34)$$

Se busca estimar una función f tal que para una entrada en \mathcal{R}^N produzca una salida en $\{\pm 1\}$, según se presenta en (2.35)

$$f: \mathcal{R}^N \rightarrow \{+1, -1\} \quad (2.35)$$

Así se puede clasificar correctamente un nuevo dato, considerando que $y = f(\vec{x})$ para este nuevo dato, es generado con la misma distribución de probabilidad $P(\vec{x}_i, y_i)$, de los datos de entrenamiento.

Como no se imponen restricciones en la función que se escoge, se pueden cometer errores en la estimación, ya que aunque se realice un buen entrenamiento, no necesariamente tiene una buena generalización para datos desconocidos. Por tanto, el aprendizaje perfecto no es posible y la minimización del error de entrenamiento no implica que haya error en la prueba [MORA06a].

2.6.1.1. Hiperplano clasificador óptimo

Así, los clasificadores con SVM se fundamentan en la obtención de hiperplanos que separen los datos de entrenamiento en dos subgrupos. Entre cada una de las clases etiquetadas como $\{-1, +1\}$, existe un único hiperplano óptimo de separación (OSH). Se busca que la distancia entre el hiperplano óptimo y el patrón de entrenamiento más cercano sea máxima, con la intención de forzar la generalización de la máquina de aprendizaje [BURG98].

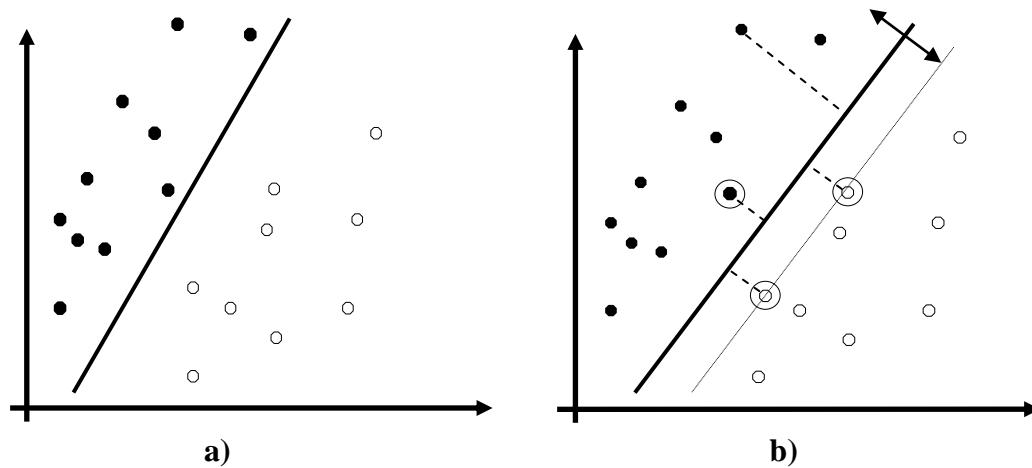


Figura 2. 19. Hiperplanos que separan correctamente un conjunto de datos. A) Hiperplano de separación de datos. B) OSH con un mayor margen de separación entre clases.

Finalmente, para implementar el localizador, se desarrollan los siguientes pasos [MORA06a], [CORR12], [GIL11]:

- a) El sistema eléctrico es dividido en zonas, asignando a cada una de ellas un conjunto de características de tensión y corriente.
- b) Obtención de los datos de entrenamiento: estos datos pueden ser obtenidos bajo simulación o también pueden ser producto de un registro de fallas real. A partir de cada registro de falla, se crea una base de datos, en la cual cada registro se identifica con el tipo de falla y su localización.
- c) Selección de las características: en esta etapa se obtiene un conjunto de descriptores que caracterizan la señal, cada conjunto de descriptores lleva asociado una etiqueta que corresponde con la zona donde ocurrió la falla.
- d) Entrenamiento: Esta etapa es llevada a cabo en dos pasos, el primero determina el conjunto de descriptores a emplear en el entrenamiento, luego se analizan las diferentes combinaciones de descriptores y se obtiene la localización correcta de la falla. Se debe definir también el tipo de *Kernel* a usar y los parámetros C y σ , este último parámetro en caso de usar el *kernel* RBF.
- e) Prueba de la estrategia de aprendizaje para el proceso de localización: esta etapa es llevada a cabo para determinar el comportamiento futuro de las SVM ante datos que no fueron usados en la etapa de entrenamiento.

Capítulo 3

3. Metodología propuesta

3.1. Introducción

Como alternativa de solución al problema propuesto en el capítulo introductorio del modelado de los circuitos de distribución y la variación de los parámetros de los componentes del circuito para los estudios de localización de falla, se propone una metodología de modelado de los diferentes elementos del circuito enfocada a la localización de fallas, para así analizar los efectos en los localizadores de fallas, de la variación de los parámetros de los diferentes elementos (carga, fuente, líneas).

Como herramienta básica para desarrollar la metodología propuesta se seleccionó como programa de simulación de circuitos eléctricos el ATP/EMTP, y como lenguaje de programación Matlab®. Además, el software *simulaciónRF* que permite una rápida obtención de las bases de datos necesarias para el proceso de estudio con los localizadores.

Este capítulo se divide en seis secciones. La primera sección trata del modelamiento del sistema eléctrico enfocado al estudio de localización de fallas y cuales son los datos mínimos necesarios para realizar el modelado de un circuito de distribución. La segunda sección tiene que ver con el modelado de las cargas en los sistemas de distribución. La tercera sección muestra el modelado de la fuente. La cuarta sección concierne al modelado de los tramos de líneas y los datos importantes a tener en cuenta. La quinta sección, tiene que ver con el modelado del transformador y su selección. Finalmente, en la sexta sección se enuncian brevemente algunos de los parámetros de los elementos del circuito que más influyen en la localización de fallas.

3.2. Modelado del sistema eléctrico enfocado al estudio de localización de fallas

Para realizar un correcto modelado de los circuitos de distribución, es necesario tener unos datos mínimos del mismo. Así, con el fin de acceder de manera eficiente y rápida a la información de los circuitos de distribución para realizar simulaciones usando la herramienta de ATP/EMTP, se proponen las siguientes tablas que contienen los datos necesarios del circuito a analizar.

A manera de ejemplo se llenaron utilizando algunos datos de un sistema prototipo (IEEE 34 nodos).

3.2.1. Datos básicos de las líneas

En la tabla 3.1 se presentan los datos básicos requeridos para el modelo de líneas. Las columnas llamadas Identificación o matrícula del nodo inicial, Identificación o matrícula del nodo final (primera y segunda columna), corresponden a los números de los nodos entre los cuales se encuentra conectado el segmento de línea denominado Identificación del tramo, en la columna 3. En la cuarta columna se consignan los valores de las longitudes de cada segmento en km. La columna 5 corresponde al código que ha designado la empresa de distribución a cada una de las estructuras presentes en sus circuitos. En la columna 6 se especifica el tipo de conductor que tiene cada segmento.

Adicional a la información suministrada, es necesario tener un plano de la distribución física del sistema.

Información de líneas para el sistema IEEE 34 Nodos					
Nivel de tensión [kV]		24900			
Identificación o matrícula del nodo inicial	Identificación o matrícula del nodo final	Identificación del tramo (máx. 6 caracteres)	Longitud [km]	Tipo de estructura	Tipo de conductor
802	806	1	0.123	500	30.5 ACSR desnudo
806	808	2	0.0456	505	30.5 ACSR desnudo

Tabla 3. 1. Información de líneas para el sistema IEEE 34 nodos

Para complementar la información de cada uno de los tramos de línea del sistema de distribución la configuración del tipo de estructura para cada una de las consideradas se debe entregar, como se muestra en la tabla 3.2.

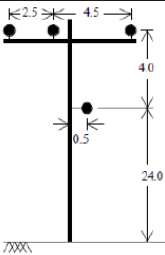
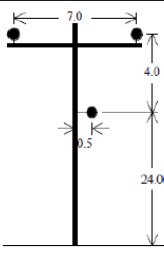
Distribución geométrica de las fases para cada una de los tipos de estructuras del sistema de distribución	
 <p>ID-500</p>	 <p>ID-505</p>

Tabla 3. 2. Tipos de estructuras del sistema IEEE 34 nodos

3.2.2. Datos básicos de las cargas

En la tabla 3.3 se encuentran consignados los datos de las cargas. La primera columna tiene consignados los nodos en los cuales se encuentran conectadas las cargas. La columna 2 contiene el nombre de la carga, según un código suministrado por IEEE 34 nodos. La

columna 3 contiene la información de la conexión. La columna 4 contiene el tipo de carga ya sea impedancia constante (Z_{cte}), corriente constante (I_{cte}) o potencia constante (S_{cte}), y las dos últimas columnas contienen los valores de potencia promedio y factor de potencia promedio.

Información de las cargas para el sistema IEEE 34 nodos					
Corriente promedio en un periodo de _ meses [A]			3500		
Identificación o matrícula del nodo	Identificación de la carga	Tipo de conexión	Tipo de carga	Potencia aparente promedio en un periodo de _ meses [kVA]	Factor de potencia promedio en un periodo de _ meses
810	Industrias la Claudia	Delta	S_{cte}	450	0.86
832	Telares Mogollón	Delta	S_{cte}	350	0.87
852	Trapiche José Miel	Delta	Z_{cte}	850	0.83
888	Funeraria el último suspiro	Delta	Z_{cte}	300	0.91
860	Panadería Prieto	Delta	I_{cte}	720	0.89
846	Juguetería el zurdo	Delta	Z_{cte}	280	0.9
830	Instituto tecnológico	Delta	I_{cte}	800	0.93

Tabla 3. 3. Información de cargas para el sistema IEEE 34 nodos

3.2.3. Datos básicos de la subestación

Los datos necesarios para el modelado de la subestación son: V_{th} , Z_{th} (o datos de la impedancia de secuencia + y 0), potencia del transformador y conexión del transformador.

3.2.4. Datos básicos del transformador

Para los datos del transformador, se hace necesario el valor de los voltajes de primario y secundario, la relación de transformación entre espiras, los parámetros de impedancia tanto en el primario como en el secundario, grupo de conexión, ángulo de desfase y la resistencia de la rama de magnetización si se posee, también los datos de potencia del mismo. En la tabla 3.4 se muestran los datos del transformador necesarios para su modelado.

Información del transformador para el sistema IEEE 34 nodos					
Subestación:	Potencia	V primario	V secundario	Impedancia de cortocircuito	
	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
	2500	69 – D	24.9 – Gr. W	1	8

Tabla 3. 4. Información del transformador para el sistema IEEE 34 nodos

Finalmente, así quedan consignados los datos necesarios para realizar el modelado de un circuito de distribución, donde se especifican los datos más relevantes de los elementos más representativos del circuito a simular para realizar un adecuado modelado.

3.3. Modelado de cargas

Para realizar el correcto modelado de las cargas como se expuso previamente en los aspectos teóricos (capítulo dos), es necesario simular adecuadamente el modelo que se desee, ya sea un modelo de impedancia constante (Z_{cte}), corriente constante (I_{cte}), potencia constante (S_{cte}) o un modelo híbrido, pues cada uno de ellos presenta un comportamiento distinto, y por ende influye en la localización de la falla. Como el ATP/EMTP actualmente no posee esta opción directa, ya que la carga se modela como una impedancia constante utilizando los modelos de impedancia propios con que cuenta el programa, como lo hacen las mayorías de las aplicaciones de localización de fallas, se desarrolló un nuevo bloque para representar la carga, el cual permite simular el modelo de la carga que se desee.

Para la selección del tipo de modelo, en este caso se eligió un modelo estático dependiente de la tensión del sistema, ya que en este caso interesan los valores de estado estable de las señales y no se realizan análisis de transitorios como se hace en el caso de modelos dinámicos.

3.3.1. Desarrollo del modelo

El modelo propuesto de la carga fue codificado usando la herramienta de *Models* del ATP/EMTP y permite modelar la carga de acuerdo a un modelo polinomial ZIP o exponencial. Este modelo usa uno de los *Models* predefinidos en el ATP/EMTP (Type-94) en su versión Norton non-transmission [DUBE96], [WATS07].

Así, fue desarrollado un modelo que básicamente obtiene los valores de la rama RL a partir de la ecuación correspondiente del modelo de la carga para simular su correcto comportamiento. Este modelo se desarrolla a través de la obtención de un modelo equivalente de Norton, como lo hace el ATP/EMTP para representar los diferentes elementos que simula [ATPR11], [WATS07], [CANO08]. Asimismo, los valores de la rama RL, son calculados y simulados por medio del bloque de *Models* con el modelo Type-94 Norton non-transmission.

3.3.1.1. Aspectos básicos del lenguaje de *Models*

Models es un lenguaje de descripción técnico soportado por una herramienta de simulación. Este es un programa enfocado a la simulación en el dominio del tiempo y es utilizado como herramienta para describir el comportamiento dinámico de sistemas físicos complejos. En el ATP/EMTP este puede ser usado para describir la operación de componentes del circuito y de control [DUBE96].

Sus características más importantes son [RAMI08]:

- Es completamente estructurado, lo cual facilita el diseño modular de sus aplicaciones.

- El lenguaje de programación está compuesto por instrucciones y sentencias sencillas y fáciles de recordar, similares a las utilizadas en lenguaje *Fortran*.
- Posee un grupo de variables residentes que facilitan la programación tales como el tiempo de simulación y la duración del paso de integración.
- Permite desarrollar modelos que manejan variables tales como voltajes, corrientes y señales de control. Esto permite modelar componentes sin requerir un conocimiento acerca de la programación interna del ATP/EMTP.
- Los componentes individuales de los *Models* de un sistema actualizan automáticamente su operación a medida que se incrementa el tiempo de simulación.

Un ejemplo del formato general de descripción para un *Models* se presenta en la figura 3.1 [DUBE96], [RAMI08].

MODEL	-- Nombre del modelo
INPUT ...	-- Nombre de las variables de entrada separadas por ','
OUTPUT ...	-- Nombre de las variables de salida
DATA ...	-- Nombre de las variables externas
CONST ...	-- Se pueden definir constantes en el modelo
VAR ...	-- Nombre de las variables locales
HISTORY ...	-- Valores por defecto de variables y expresiones {DFLT:n}
INIT ...	-- Inicializacion
ENDINIT ...	
EXEC ...	-- Ejecucion del programa
ENDEXEC	
ENDMODEL	

Figura 3. 1. Formato general de descripción para un *Models*

3.3.1.2. Uso del *Models* Type-94

En ATP/EMTP, el componente no lineal Type-94 es un componente de rama del circuito que puede ser definido por el usuario. La operación de este componente es completamente descrita por el usuario en el modelo y colocada en la sección de *Models* de la plantilla del ATP/EMTP por el componente Type-94 en el circuito.

El modelo Type-94 puede ser usado en tres diferentes modos: Thevenin, Iterado y Norton. En cada caso la interfaz con el circuito es la conexión eléctrica del componente definido en términos de voltajes y corrientes, que son tomados al inicio de la simulación en estado estable y permiten realizar la inicialización del modelo. Cada uno puede ser usado para representar un elemento no lineal del circuito, con o sin controles asociados.

En el caso del modelo Type-94 Norton non-transmission la salida del modelo es el equivalente de Norton del componente, como se ve desde el circuito eléctrico, en la forma de una fuente de corriente en paralelo con la admitancia equivalente del componente. Así, este componente fue seleccionado para realizar la representación del modelo de la carga, debido a que el ATP/EMTP para simular los diferentes elementos del circuito lo hace por medio de su equivalente de Norton [ATPR11], [WATS07], [CANO08].

3.3.1.3. Discretización de los elemento R y L en el ATP/EMTP

Ahora bien, como se menciona en el capítulo dos, el ATP/EMTP, emplea la integración trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema en el dominio del tiempo, lo que permite realizar fácilmente la discretización de las ecuaciones de los elementos que se deseen implementar [WATS07]. Así, para la discretización de los elementos R y L se tiene:

- *Resistencia*

El elemento de circuito más simple es un resistor conectado entre los nodos k y m , como se muestra en la figura 3.2 y es representado por la ecuación (3.1).

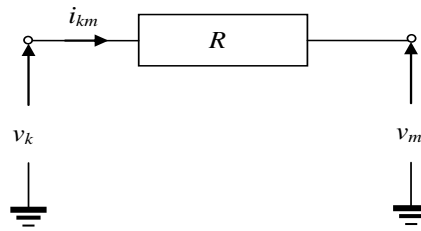


Figura 3. 2. Resistencia

$$i_{km(t)} = \frac{1}{R} \cdot (v_{k(t)} - v_{m(t)}) \quad (3.1)$$

Si el nodo m esta conectado a tierra como es el caso del modelo Type-94 en su versión Norton non-transmission, el valor de $v_m(t) = 0$, y la ecuación (3.1) queda:

$$i_{km(t)} = \frac{1}{R} \cdot v_{k(t)} \quad (3.2)$$

- *Inductor*

La ecuación diferencial para el inductor mostrado en la figura 3.3, se muestra en la ecuación (3.3).

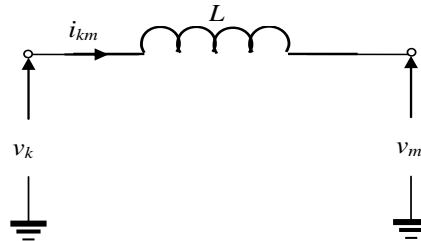


Figura 3. 3. Inductor

$$v_L = v_k - v_m = L * \frac{di_{km}}{dt} \quad (3.3)$$

Reordenando se tiene:

$$i_{km(t)} = i_{km(t-\Delta t)} + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (v_k - v_m) dt \quad (3.4)$$

Aplicando la regla trapezoidal se obtiene:

$$i_{km(t)} = i_{km(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} ((v_k(t) - v_m(t)) + (v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t))) \quad (3.5)$$

$$i_{km(t)} = i_{km(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} (v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t)) + \frac{\Delta t}{2L} (v_k(t) - v_m(t)) \quad (3.6)$$

$$i_{km(t)} = i_{History(t-\Delta t)} + \frac{1}{R_{eff}} (v_k(t) - v_m(t)) \quad (3.7)$$

Así, la ecuación (3.7) puede ser representada en forma de un equivalente de Norton (o circuito compañero) como lo muestra la figura 3.4. El termino que relaciona la contribución de corriente instantánea con el voltaje en el paso de tiempo actual ($1/R_{eff}$) es una conductancia (termino instantáneo) y la contribución de corriente de las cantidades del paso de tiempo anterior, es una fuente de corriente (término histórico) [WATS07], [CANO08].

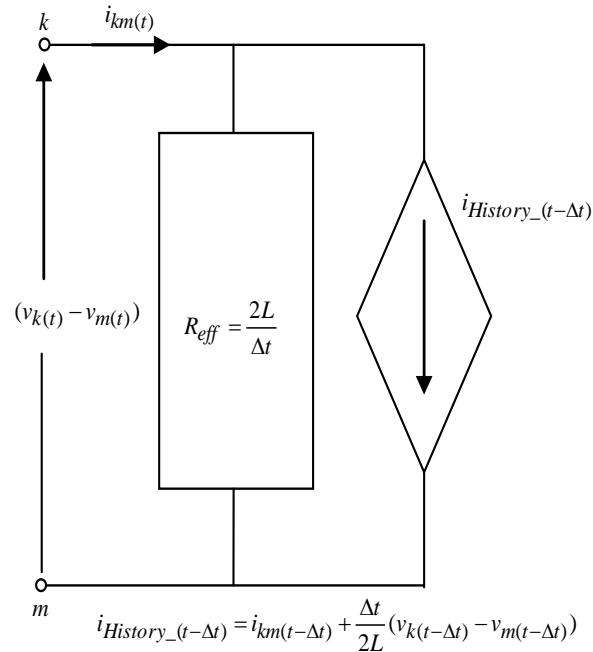
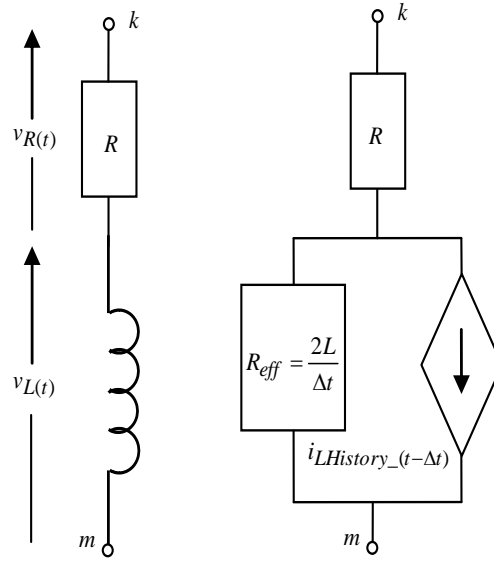


Figura 3. 4. Equivalente de Norton del inductor

- *Reducción de componentes, rama RL*

Ahora bien, diferentes componentes pueden ser combinados en un solo Norton equivalente, reduciendo así el número de nodos y por lo tanto el cálculo en cada punto en el tiempo. Considerando el caso de la rama *RL* se tiene el circuito de la figura 3.5.


 Figura 3. 5. Circuito RL para obtener equivalente de Norton

La corriente histórica para el inductor es:

$$i_{LHistory}(t-\Delta t) = i_{(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} v_{L(t-\Delta t)} \quad (3.8)$$

$$v_{L(t-\Delta t)} = v_{(t-\Delta t)} - i_{(t-\Delta t)} \cdot R \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ecuación (3.9) en la ecuación (3.8) y ordenando se obtiene:

$$i_{LHistory}(t-\Delta t) = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot R}{2L}\right) i_{(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} v_{(t-\Delta t)} \quad (3.10)$$

El valor de la fuente de corriente para el circuito equivalente de Norton para la rama RL completa es calculado fácilmente por medio de la corriente de corto-circuito. La corriente de corto-circuito se calcula cuando se cortocircuita la salida, quedando el circuito de la figura 3.5 con dos resistencias en paralelo (R y $2L/\Delta t$) y una fuente de corriente, donde la corriente de corto-circuito es la que fluye por la resistencia R [WATS07]. Así, aplicando un divisor de corriente al circuito obtenido se tiene:

$$i_{cc} = \left(\frac{2L/\Delta t}{R + 2L/\Delta t}\right) i_{LHistory}(t-\Delta t) = i_{RLHistory}(t-\Delta t) \quad (3.11)$$

Remplazando el término histórico y ordenando se llega a:

$$i_{RLHistory}(t-\Delta t) = \frac{\left(1 - \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)}{\left(1 + \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)} i_{(t-\Delta t)} + \frac{\frac{\Delta t}{2L}}{\left(1 + \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)} v_{(t-\Delta t)} \quad (3.12)$$

Ahora el término de la componente instantánea de corriente se obtiene calculando la corriente que fluye por el circuito cuando se a colocado un voltaje en los terminales y la fuente de corriente de la figura 3.5 esta abierta (corriente de circuito abierto). Esta corriente es:

$$\frac{1}{\left(R + \frac{2L}{\Delta t}\right)} v_{(t)} = \frac{\frac{\Delta t}{2L}}{\left(1 + \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)} v_{(t)} \quad (3.13)$$

Por tanto, la ecuación de la corriente total expresada en términos del voltaje de rama es obtenida sumando las ecuaciones (3.12) y (3.13).

$$i_{(t)} = \frac{\left(1 - \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)}{\left(1 + \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)} i_{(t-\Delta t)} + \frac{\frac{\Delta t}{2L}}{\left(1 + \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)} (v_{(t-\Delta t)} + v_{(t)}) \quad (3.14)$$

Finalmente, el correspondiente circuito equivalente de Norton es mostrado en la figura 3.6.

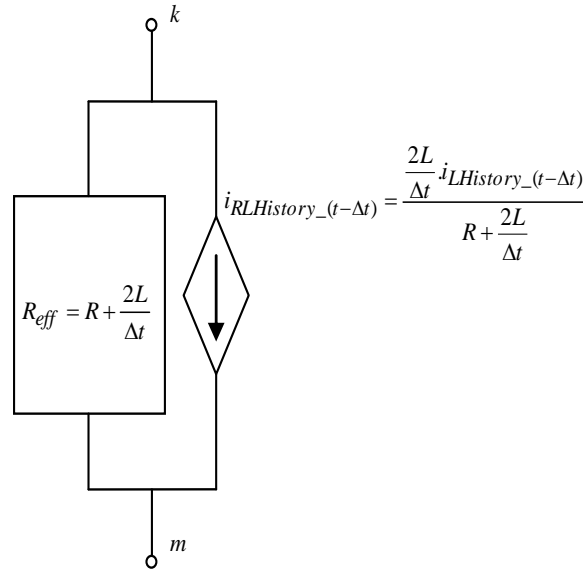


Figura 3. 6. Equivalente de Norton para el circuito RL

Así, a partir de las ecuaciones (2.1) y (2.2), para el modelo de la carga y la ecuación (3.14), para representar la rama RL , se realizó la implementación de un modelo de carga inicial utilizando la herramienta de *Models*, por medio del componente Type-94 Norton non-transmission. Después de implementado este modelo, fue probado por medio del ATP/EMTP con un circuito sencillo para ver el comportamiento de las señales; presentando en algunos casos cuando el valor de la potencia era aumentado, oscilaciones numéricas.

3.3.1.4. Amortiguamiento de oscilaciones numéricas

La regla trapezoidal utilizada en el ATP/EMTP en algunos casos produce oscilaciones numéricas [WATS07], [CANO08], [EMTP94]. Por ejemplo, cuando la corriente a través de un inductor es forzada a tomar un determinado valor (discontinuidad en di/dt), la regla trapezoidal genera oscilaciones que no se atenúan en el tiempo. La figura 3.7 muestra los errores debidos a las oscilaciones numéricas en la señal de tensión de un circuito de distribución, presentadas por el modelo de la carga inicialmente implementado.

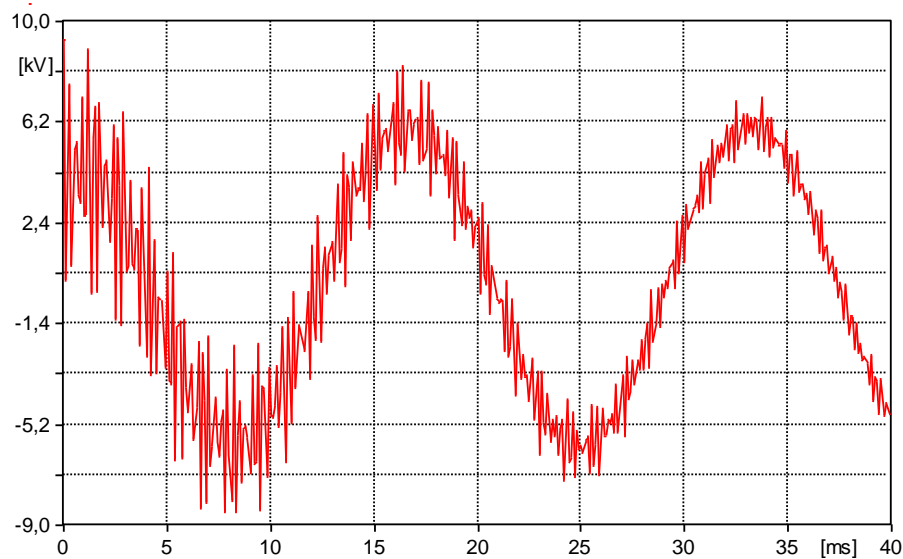


Figura 3. 7. Oscilación numérica en señal de tensión

El origen de las oscilaciones se debe a que en la representación discreta del sistema en el algoritmo de la solución numérica, una magnitud derivada que debe interrumpirse, difícilmente pueda hacerse en el cruce por cero de la misma.

En este caso lo que ocurre con el *Models Type-94* es que como es un elemento no lineal, el ATP/EMTP no lo incluye en la inicialización de estado estable del circuito en el tiempo $t = 0$ [DUBE96]. Luego, en el siguiente paso de tiempo, hay un suicheo que produce que la corriente cambie bruscamente y en el tiempo $t + \Delta t$ ésta tiene un valor distinto y esto hace que se produzca la oscilación, pues el elemento representado es un elemento resistivo-inductivo, donde la inductancia es la causante la oscilación.

Así, estos fenómenos de oscilaciones numéricas, tienen una contraparte física relacionada con los cambios bruscos de magnitudes eléctricas (tensión, corriente) en bornes de elementos que almacenan energía (capacitores, reactores). Adicionalmente, la diferencia entre el fenómeno matemático y el físico radica en el amortiguamiento de las oscilaciones, escaso o nulo en el primero y real en el segundo. Asimismo la frecuencia observada para el caso matemático es igual a la frecuencia de Nyquist y se modifica al variar Δt [CANO08]. Finalmente, para atenuar el efecto de las oscilaciones en el ATP/EMTP se incorporan resistencias de amortiguamiento. En este método se introduce una resistencia en paralelo al componente en particular, que en este caso, para el modelo de la carga con un circuito RL

sería la inductancia. La figura 3.8 muestra el circuito tenido en cuenta para la discretización.

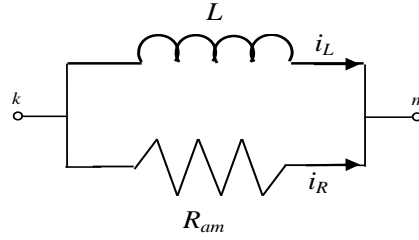


Figura 3. 8. Circuito para inductancia con resistencia de amortiguamiento

$$v(t) = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad v(t) = R_{am} \cdot i_R \quad (3.15)$$

Aplicando la regla de integración trapezoidal a los dos componentes, para la resistencia:

$$i_{R(t)} = \frac{v(t)}{R_{am}} \quad i_{R(t-\Delta t)} = \frac{v(t-\Delta t)}{R_{am}} \quad (3.16)$$

Para la inductancia:

$$i_{L(t)} = i_{L(t-\Delta t)} + \frac{\Delta t}{2L} (v(t) + v(t-\Delta t)) \quad (3.17)$$

La corriente total será:

$$i(t) = i_{L(t)} + i_{R(t)} = \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right) \cdot v(t) + \frac{\Delta t}{2L} v(t-\Delta t) + i_{L(t-\Delta t)} \quad (3.18)$$

Considerando que:

$$i_{L(t-\Delta t)} = i_{(t-\Delta t)} - i_{R(t-\Delta t)} = i_{(t-\Delta t)} - \frac{v(t-\Delta t)}{R_{am}} \quad (3.19)$$

Remplazando la ecuación (3.19) en la (3.18) para obtener la corriente total:

$$i(t) = \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right) \cdot v(t) - \left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L} \right) v(t-\Delta t) + i_{(t-\Delta t)} \quad (3.20)$$

Donde:

$$i_{History(t-\Delta t)} = \left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L} \right) v(t-\Delta t) + i_{(t-\Delta t)} \quad (3.21)$$

Reordenando términos de la ecuación (3.20), se llega a:

$$v_{(t)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \cdot (i_{(t)} - i_{(t-\Delta t)}) + \frac{\left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} v_{(t-\Delta t)} \quad (3.22)$$

Donde:

$\frac{1}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}$ Es una resistencia equivalente que será necesaria agregar para evitar la oscilación.

$\frac{\left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}$ Es un factor de amortiguamiento que atenúa las oscilaciones.

Así, el circuito equivalente de Norton para este modelo se muestra en la figura 3.9.

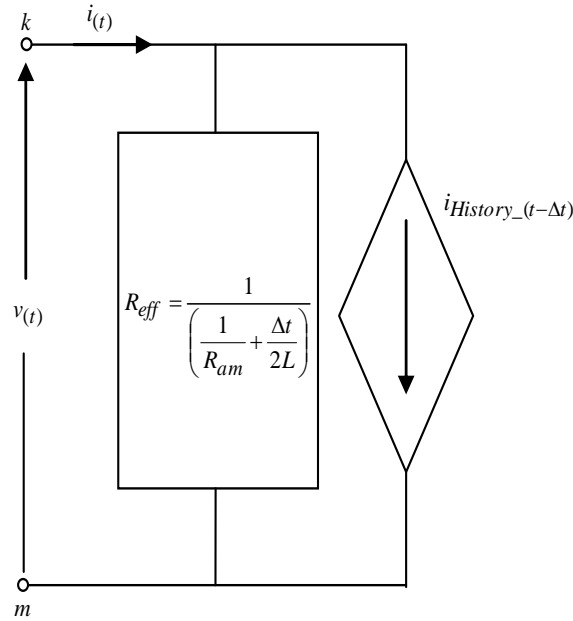


Figura 3. 9. Circuito equivalente de Norton para inductancia con resistencia de amortiguamiento

Finalmente, se concluye que se debe seguir un lineamiento para abolir la inestabilidad numérica; que en este caso es [WATS07], [CANO08]:

- Los inductores deben estar conectados con un resistor de amortiguamiento en paralelo talque el valor de la inductancia sobre la resistencia de amortiguamiento sea mayor o igual al paso de integración, como se muestra en la ecuación (3.23).

$$\frac{L}{R_{am}} \geq \Delta t \quad (3.23)$$

- Reducción de componente RL con resistencia de amortiguamiento.

Ahora bien, siguiendo el mismo procedimiento descrito para la rama RL , pero incluyendo la resistencia de amortiguamiento en paralelo con el inductor, se tiene el circuito de la figura 3.10, y así se obtiene su correspondiente equivalente de Norton.

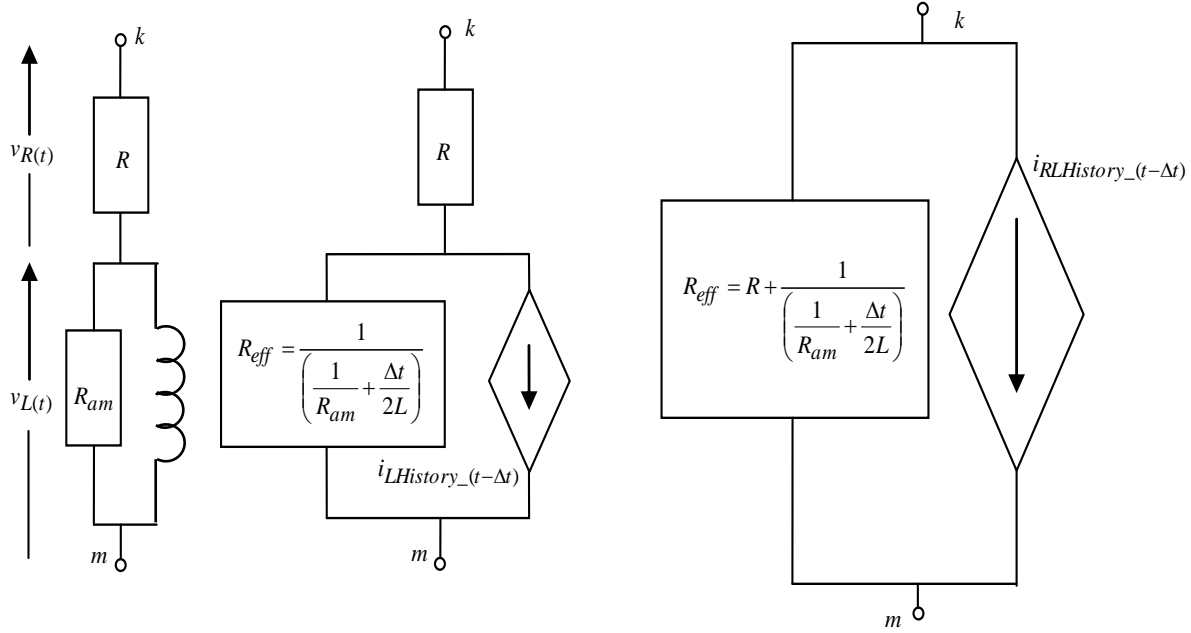


Figura 3. 10. Circuito RL con resistencia de amortiguamiento R_{am} , para obtener el correspondiente equivalente de Norton

La corriente histórica para el inductor es:

$$i_{LHistory}(t-\Delta t) = -\left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)v_{L(t-\Delta t)} + i_{(t-\Delta t)} \quad (3.24)$$

$$v_{L(t-\Delta t)} = v_{(t-\Delta t)} - i_{(t-\Delta t)} \cdot R \quad (3.25)$$

Sustituyendo la ecuación (3.25) en la ecuación (3.24) y ordenando se obtiene:

$$i_{LHistory}(t-\Delta t) = \left(1 + \frac{1}{R_{am}} - \frac{R \cdot \Delta t}{2L}\right)i_{(t-\Delta t)} - \left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)v_{(t-\Delta t)} \quad (3.26)$$

Ahora bien, calculando la corriente de cortocircuito, que en este caso es el valor de la fuente de corriente para el circuito equivalente de Norton ($i_{RLHistory}(t-\Delta t)$). Ésta se calcula cuando se cortocircuita la salida, quedando el circuito con dos resistencias en paralelo (R y $1/(1/R_{am} + \Delta t/2L)$) y una fuente de corriente, donde la corriente de corto-circuito es la que fluye por la resistencia R [WATS07]. Así, aplicando un divisor de corriente al circuito obtenido se tiene:

$$i_{cc} = \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}}{R + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}} \cdot i_{LHistory(t-\Delta t)} = i_{RLHistory(t-\Delta t)} \quad (3.27)$$

Remplazando el término histórico y ordenando se llega a:

$$i_{RLHistory(t-\Delta t)} = \left[\frac{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] i_{(t-\Delta t)} - \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] v_{(t-\Delta t)} \quad (3.28)$$

Ahora el término de la componente instantánea de corriente se obtiene calculando la corriente que fluye por el circuito cuando se a colocado un voltaje en los terminales y la fuente de corriente está abierta (corriente de circuito abierto). Esta corriente es:

$$\left[\frac{1}{R + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}} \right] v_{(t)} = \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] v_{(t)} \quad (3.29)$$

Por tanto, la ecuación de la corriente total expresada en términos del voltaje de rama es obtenida sumando las ecuaciones (3.28) y (3.29).

$$i_{(t)} = \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] v_{(t)} + \left[\frac{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] i_{(t-\Delta t)} + \dots \quad (3.30)$$

$$\dots - \left[\frac{\left(\frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L}\right)}{1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L}\right)} \right] v_{(t-\Delta t)}$$

Finalmente, con las ecuaciones (2.1) y (2.2), para el modelo de la carga y las ecuaciones (3.23) y (3.30), para representar la rama RL con la resistencia de amortiguamiento, por medio de un circuito de Norton equivalente, se implemento el modelo de la carga en el cual se abolieron las oscilaciones numéricas. La figura 3.11 muestra la misma señal de tensión de un circuito de distribución que el de la figura 3.7, pero con el modelo de la carga final, donde se ha adicionado la resistencia de amortiguamiento para eliminar las oscilaciones numéricas.

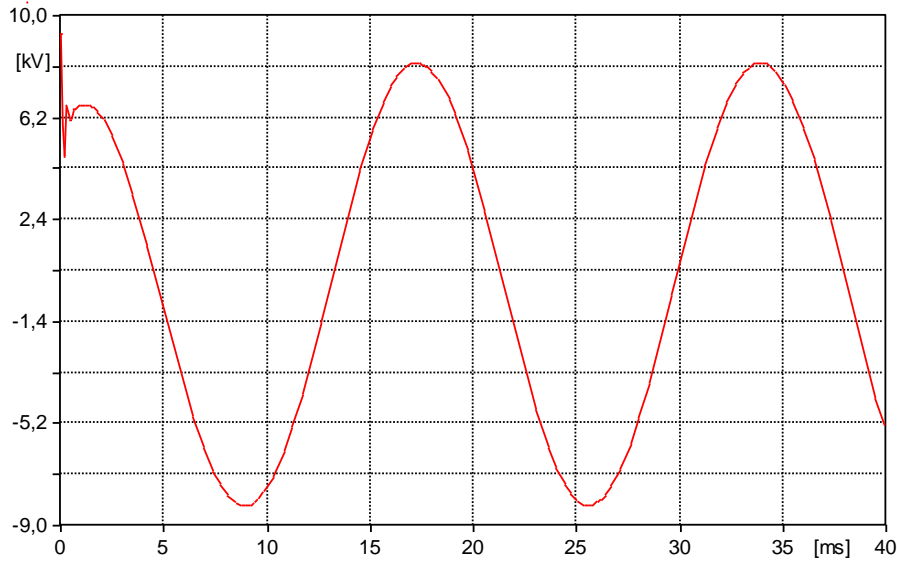


Figura 3. 11. Señal de tensión luego de abolir la oscilación numérica

3.3.1.5. Implementación del modelo de la carga y ajustes

Los datos que fueron usados para realizar la configuración del modelo de la carga que usa la herramienta de *Models* del ATP son: la potencia de la carga [VA] (S_{nom}); el factor de potencia de la carga (fp); la tensión nominal [V] (V_{nom}); la tensión de operación inicial [V] (V_{opi}), con esta se inicializa el modelo de la carga y es igual al voltaje de fase nominal al cual esta sometida la carga, estos valores de tensión se deben ingresar en valor *rms* y ser valores de fase; es decir, que si por ejemplo se tiene un circuito de 34.5kV, los valores de la tensión nominal y de la tensión de operación inicial serán $V_{nom} = V_{opi} = 34500/\sqrt{3}$. Además, se debe ingresar la tensión de ruptura del modelo de la carga en p.u. (V_{break}). Su valor por defecto es 0.6 p.u como se sugiere en [SIEM10]. Adicionalmente, los parámetros que definen el tipo de modelo a utilizar (bp y bq), 0 para S_{cte} , 1 para I_{cte} y 2 para Z_{cte} [AGUE06], [IEEE93].

También, los valores de los coeficientes ZIP de carga entre 0 y 1, que indican el porcentaje de distribución de cada tipo de carga para la potencia activa ($ap0$, $ap1$, $ap2$); es decir, que si se posee una carga que tiene una distribución de potencia activa de $S_{cte}=10\%$, $I_{cte}=30\%$ y $Z_{cte}=60\%$, estos coeficientes serán $ap0=0.1$, $ap1=0.3$ y $ap2=0.6$. $ap0$ es el coeficiente para S_{cte} , $ap1$ para I_{cte} y $ap2$ para Z_{cte} . La consideración anterior aplica para la potencia reactiva, variando los valores de $aq0$, $aq1$, $aq2$.

Ahora bien, si se desea un modelo híbrido exponencial los valores bp y bq pueden cambiar; por otro lado si el modelo híbrido que se desea es ZIP, los valores bp y bq se dejan en 1 y se cambian los valores de los coeficientes del modelo ZIP ($ap0$, $ap1$, $ap2$ y $aq0$, $aq1$, $aq2$).

Adicionalmente, se incluyeron parámetros que indican el porcentaje de variación de la carga para R o X respectivamente (pr y px). Cuando se desee realizar este tipo de

variación, I indica que la carga está al 100%. Asimismo, con el fin de poder realizar la reducción del circuito en radiales equivalentes, por medio de una herramienta de reducción desarrollada en el grupo de investigación [BEDO12a], se incluyeron los datos del número del nodo al cual se encuentra conectada la carga (*Nodo*); la fase donde se encuentra conectada la carga (*Fase*), 1 para fase A, 2 para fase B o 3 para fase C; y la visualización de la escritura de los valores solicitados para realizar la reducción del circuito (*Vista*), 0 deshabilita escritura y 1 habilita escritura.

Finalmente, un ajuste adicional que se realizó al *Models* es la inclusión del voltaje de ruptura (V_{break}), como se menciono anteriormente [SIEM10]. Esto se hizo con el fin de que cuando ocurriera una falla, si el voltaje en el modelo es menor que el voltaje de ruptura, entonces el modelo pasa a ser un modelo de impedancia constante (Z_{cte}), pues una disminución tan pronunciada del voltaje no sería real. Así, la figura 3.12(a), muestra la característica de la carga para el modelo de potencia constante (S_{cte}), para valores de V_{break} de 0,6, 0,7 y 0,8 p.u; y la figura 3.12(b), muestra la característica de la carga para el modelo de corriente constante (I_{cte}).

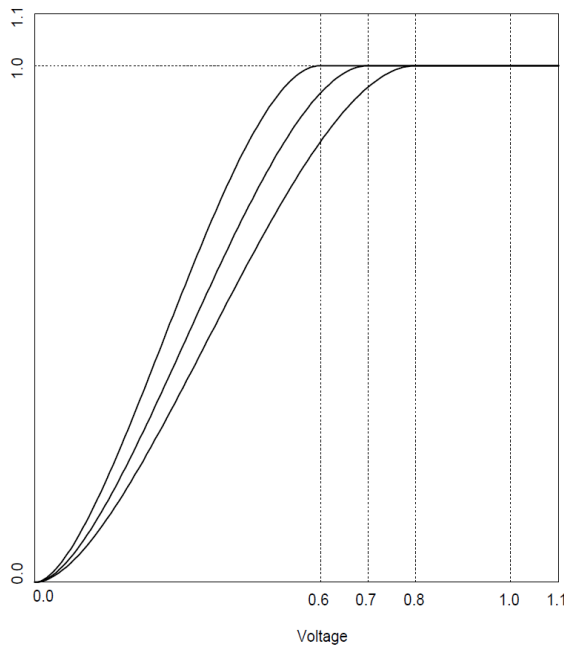


Figura 3.12 (a).

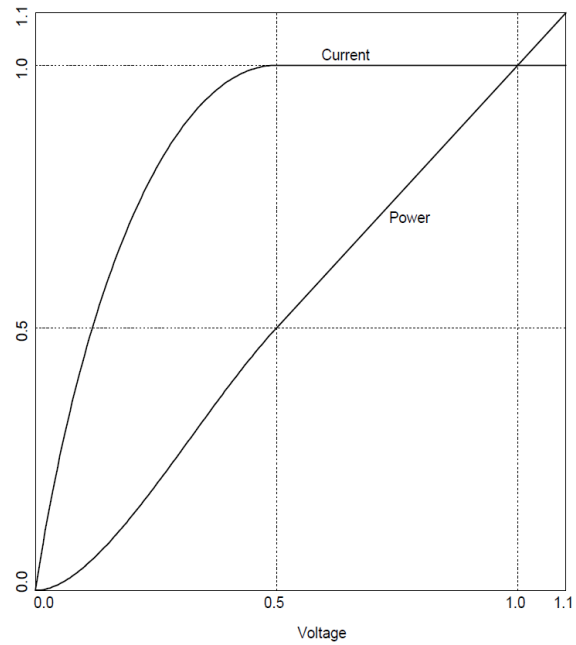


Figura 3.12 (b).

Figura 3. 12 (a). Característica de la carga para el modelo de potencia constante (S_{cte}). (b). Característica de la carga para el modelo de corriente constante (I_{cte}).

De esta forma, el modelo de la carga programado mantiene su comportamiento bajo el modelo ingresado, mientras el voltaje de la carga en p.u sea mayor que el voltaje de ruptura (V_{break}).

La figura 3.13 (a), muestra la ventana de datos del modelo de la carga programado por medio de la herramienta de *Models* del ATP (Type-94), y la figura 3.13 (b), muestra el esquema del modelo en el ATPDraw.

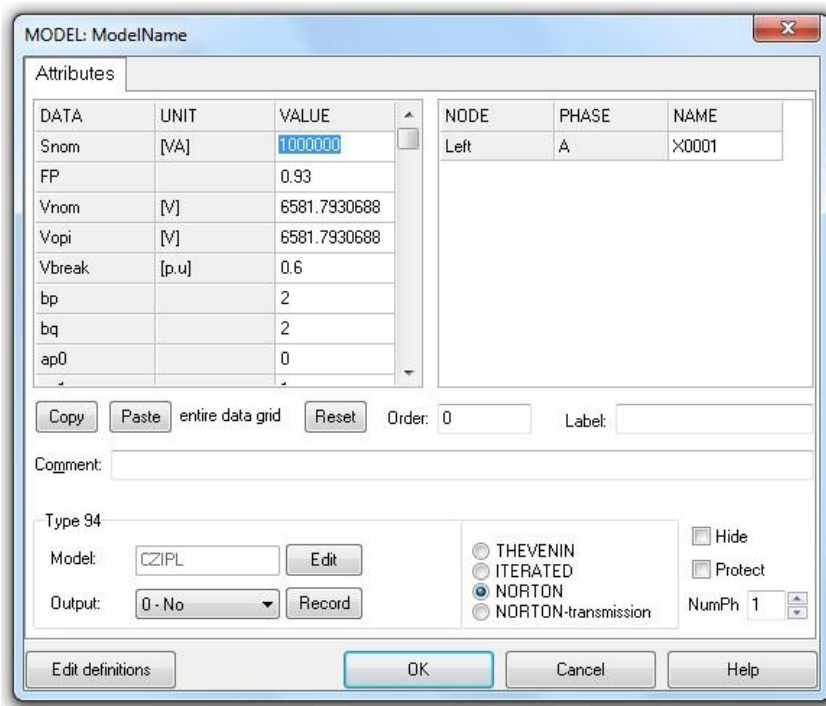


Figura 3.13 (a).

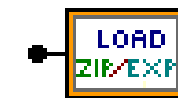


Figura 3.13 (b).

Figura 3. 13 (a). Ventana de datos del modelo de la carga programado por medio de la herramienta de *Models* del ATP en ATPDraw. (b). Esquema del modelo programado en el ATPDraw.

La imagen del esquema del modelo programado de la figura 3.13 (b) se diseño por medio de la opción “*Edit definitions*” de la ventana del *Models* Type-94 del ATP, que se encuentra en la parte inferior izquierda. Allí, se selecciono la opción “*Bitmap/Icon Editor*” y se modifico el tipo de icono hasta obtener el mostrado en la figura.

Adicionalmente, el valor de la resistencia de amortiguamiento (R_{am}), fue calculado internamente dentro de la programación del modelo de la carga de acuerdo a la ecuación (3.23).

3.3.1.6. Diagrama de flujo del modelo de la carga

El diagrama de flujo que se siguió para realizar la programación del modelo de la carga por medio de la herramienta de *Models* del ATP se muestra en la figura 3.14. Adicionalmente, el lenguaje utilizado en la programación del *Models* es el lenguaje *fortran*. El código fuente escrito en lenguaje *fortran* y que fue implementado en el *Models* Type-94 en su versión Norton non-tranmission se muestra en el Anexo A.1.

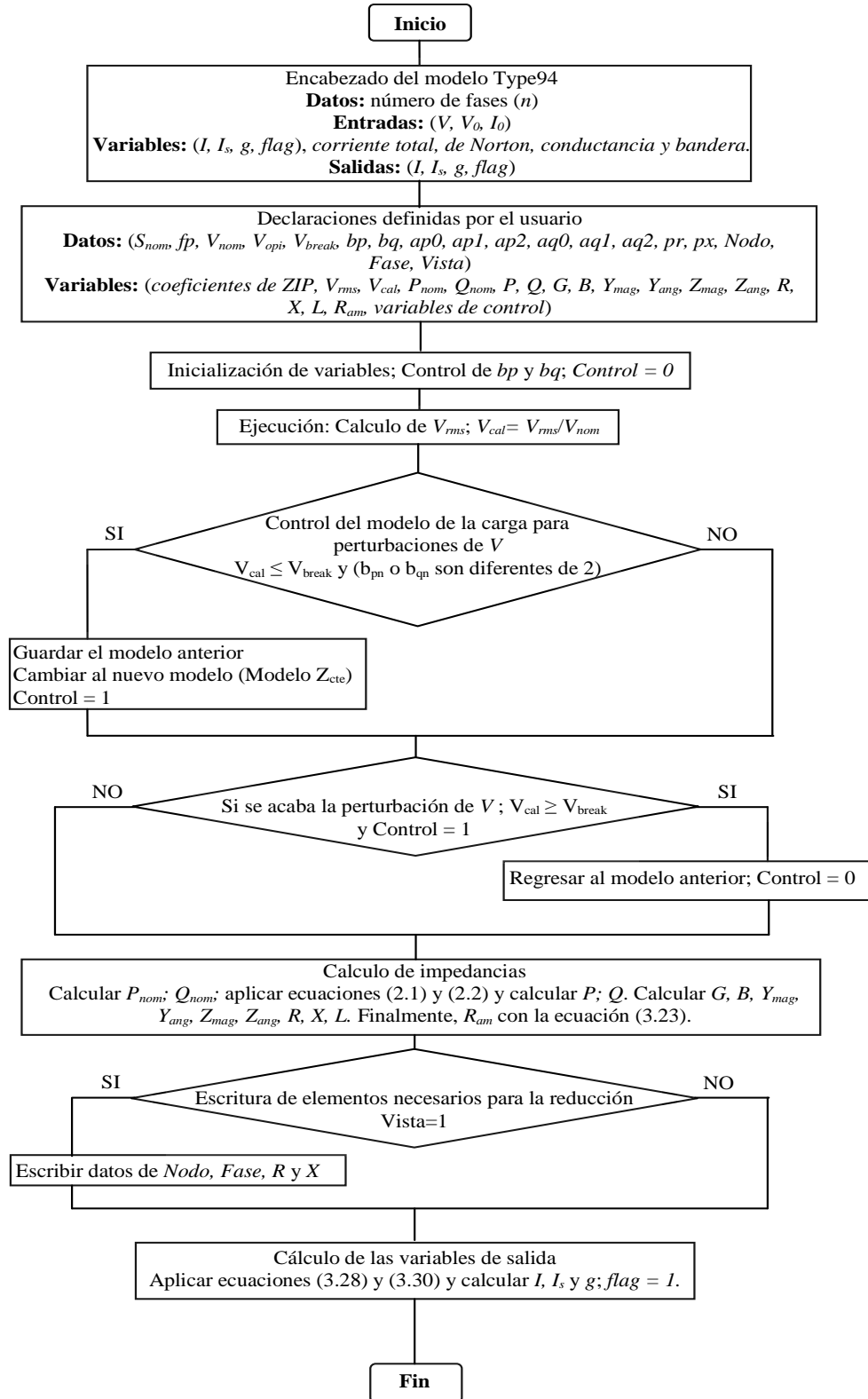


Figura 3. 14. Diagrama de flujo que se siguió para realizar la programación del modelo de la carga por medio de la herramienta de *Models* del ATP

En el esquema anterior, se explica de forma detallada el flujo que sigue la programación del modelo de la carga. En el primer cuadro de declaración, esta el encabezado del *Models* type-94, estas declaraciones son necesarias para cualquier *Models* Type-94 en su versión Norton non-transmission. Los datos y valores de entrada son proporcionados al modelo por el ATP, y los valores de salida son utilizados por el ATP. Las siguientes declaraciones son definidas por el usuario y tienen que ver con los datos y variables utilizados para realizar la programación del modelo de la carga. Finalmente, esta la inicialización y ejecución del modelo del modelo de la carga, siguiendo el formato de programación de *Models* del esquema que se mostró en la figura 3.1 previamente.

3.3.1.7. Conexión del modelo en delta (Δ) y estrella (Y)

Debido a que se pueden tener cargas en delta (Δ) o en estrella (Y), y ya que el modelo de la carga solo se encuentra programado como un modelo de Norton aterrizado; es decir, que tiene solo una conexión disponible, pues la del otro extremo se encuentra conectada a tierra. Entonces, fácilmente con el modelo de la carga programado se pueden tener cargas con conexión en estrella (Y), ya sea que se conecten a una fase, a dos fase, o a tres fases; solo conectando cada nodo disponible del modelo de la carga a la fase correspondiente.

Ahora bien, cuando se desea tener una conexión en delta de la carga, la solución aplicada es colocar un transformador Delta-estrella (ΔY), con relación de transformación uno a uno y una impedancia de cortocircuito muy pequeña; como si fuera un transformador ideal, con el fin de que al simular el modelo de la carga, en el primario se vea como una conexión en Delta (Δ). Así, en el caso de una conexión en Delta (Δ) para la carga, se implementa una conexión con un transformador (ΔY_5). La fase del transformador es seleccionada, puesto que en la mayoría de circuitos reales, de acuerdo al trabajo realizado por el grupo de investigación, se encuentra que el transformador que alimenta a la carga en un sistema de distribución presenta este tipo de conexión [KERT02]. Esto hace que el modelo simulado presente un comportamiento más acorde con el circuito real.

Entonces, para referir la carga que se encuentra en el secundario con conexión en (Y) a la Delta (Δ) del primario del transformador y ver la relación que tiene cada carga en estrella (Y), con su correspondiente en Delta (Δ), se realizó un estudio y analizó el manejo del circuito del transformador ΔY_5 [RODA10], [KERT02].

Se asume que el transformador es aproximadamente ideal, pues se tomó el correspondiente a uno trifásico *saturable*, pero se modificaron las condiciones de tal manera que se comportara aproximadamente como un transformador ideal.

Los datos introducidos al transformador por medio del ATPDraw son los mostrados en la figura 3.15.

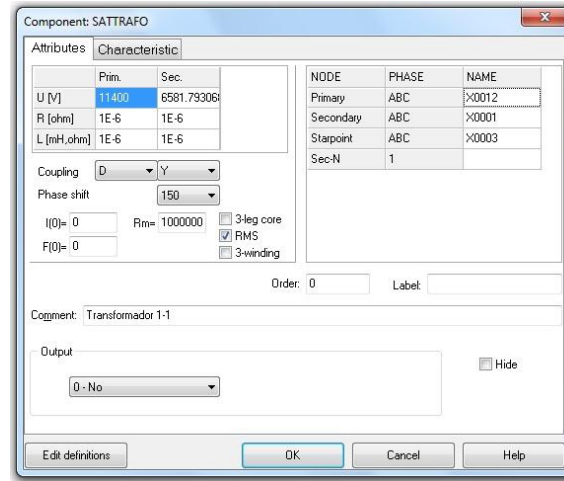


Figura 3. 15. Ventana de ingreso de datos para el transformador ΔY_5

Dónde la relación de transformación de devanados es $\left(ad = \frac{V_p}{V_p/\sqrt{3}} = \frac{1}{1/\sqrt{3}} \right)$, esta se entiende como relación de transformación de devanados uno a uno, debido a la conexión propia del transformador (ΔY_5), pues en el lado primario se tiene un voltaje línea a línea (V_{LL}), y en el lado del secundario un voltaje línea a neutro (V_{fn}).

La impedancia del primario y el secundario son iguales y son las mas pequeñas que se pueden colocar ($Z_{ccp} = Z_{ccs} = 1 \times 10^{-6} + j.1 \times 10^{-6}$). Estos valores son los que se toman siempre al trabajar con *Models* para el modelamiento de la carga.

Así el procedimiento que debe llevarse a cabo para referir la impedancia que se tiene en el lado del secundario al lado primario del transformador es el siguiente. Partiendo de la figura 3.16 que muestra el diagrama circuital para el transformador ΔY_5 .

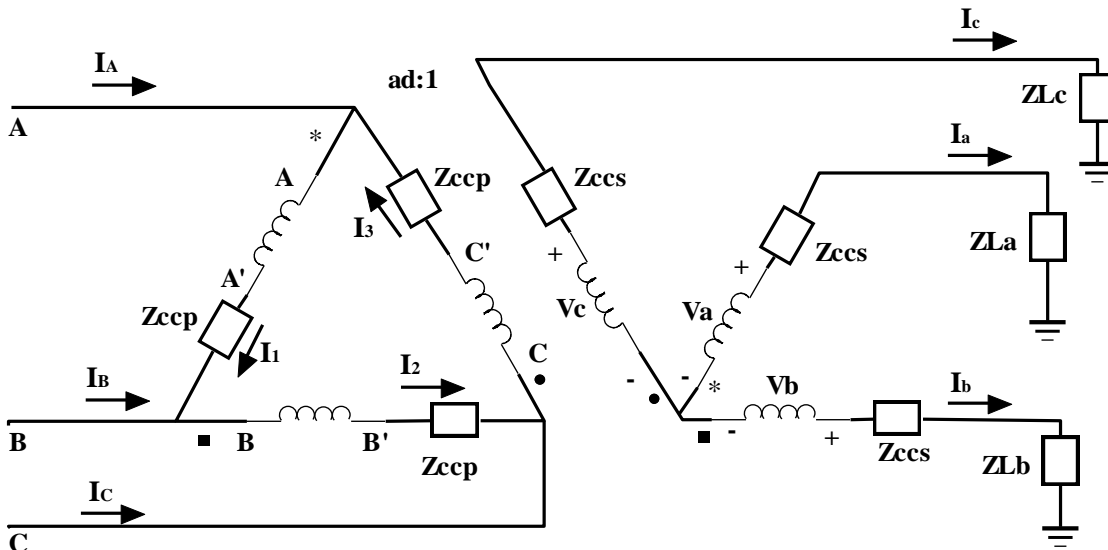


Figura 3. 16. Diagrama circuital del transformador ΔY_5

En la figura anterior Z_{La} , Z_{Lb} y Z_{Lc} representan las cargas de los *Models*, programadas con el componente Type-94. Ahora bien, a partir del circuito de la figura 3.16, se pueden obtener los valores de las impedancias respectivas referidas al lado del primario del transformador en Delta (Δ) de la siguiente manera:

$$Z_{refp} = ad^2 Z_s \quad (3.31)$$

Dónde:

Z_{refp} : Impedancia referida al lado del primario del transformador.

ad : Relación de transformación de devanados. Para ΔY_5 $ad = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{3}}}$

Z_s : Impedancia vista en el lado del secundario.

Así al aplicar la ecuación (3.31) para obtener la impedancia total en el lado del primario del transformador (ΔY_5) se obtienen las ecuaciones (3.32), (3.33) y (3.34).

$$Z_{ABp} = Z_{ccp} + ad^2(Z_{ccs} + Z_{La}) \quad (3.32)$$

$$Z_{BCp} = Z_{ccp} + ad^2(Z_{ccs} + Z_{Lb}) \quad (3.33)$$

$$Z_{CAp} = Z_{ccp} + ad^2(Z_{ccs} + Z_{Lc}) \quad (3.34)$$

La figura 3.17 muestra el esquema final del circuito con la carga referida a la delta del transformador.

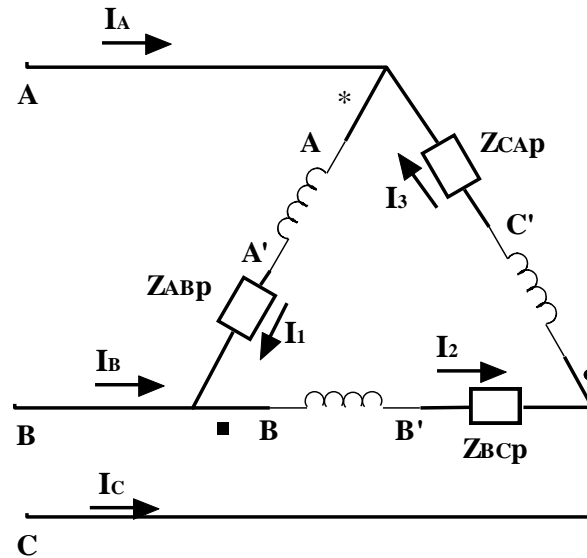


Figura 3. 17. Diagrama circuital con impedancia referida al lado primario del transformador ΔY_5

Finalmente, de acuerdo a las ecuaciones (3.32), (3.33) y (3.34), se puede observar la correspondencia que tiene cada carga por fase, representada por el modelo de carga, con su

respectiva carga en delta (Δ), en el lado de alta del transformador. Así, si por ejemplo se desea obtener una carga equivalente en Delta conectada entre las fases B y C, solo se debe conectar una carga equivalente en Y en el lado del secundario del transformador, pero conectada en la fase B (ecuación 3.33) con la herramienta de *Models*. Asimismo, la figura 3.18 (a), muestra el esquema de una carga trifásica implementada con el modelo de la carga programado, con conexión en estrella (Y) y la figura 3.18 (b), muestra su equivalente pero modelada con conexión en Delta (Δ).

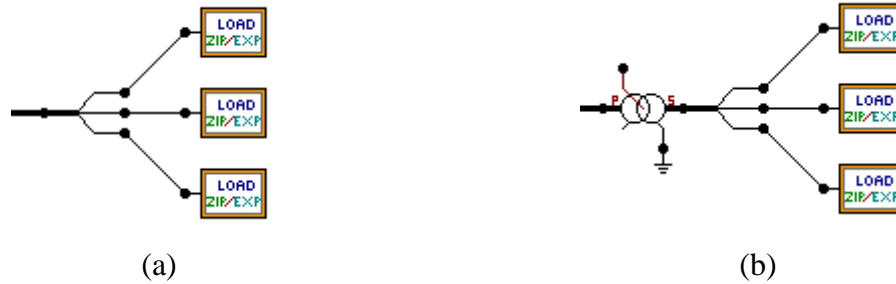


Figura 3. 18 (a). Carga trifásica implementada con el modelo de la carga programado, con conexión en estrella (Y), (b). Carga equivalente pero modelada con conexión en Delta (Δ).

3.3.1.8. Validación del modelo de la carga

Para la validación del modelo de la carga, se compararon los flujos de potencia de un circuito de prueba, utilizando un modelo de carga de impedancia constante (Z_{cte}), corriente constante (I_{cte}), potencia constante (S_{cte}) y un modelo híbrido en el ATP, con los obtenidos en el software *Neplan* tomado como referencia, como se muestra en [PATI12a], [PATI12b]. Esta es una tesis de pregrado, en la cual se presto asesoramiento y se desarrolla la validación de modelo de la carga implementado. Para realizar las pruebas y validación al modelo desarrollado, se utilizó un circuito de distribución modificado a partir del circuito de 13 nodos de la IEEE [IEEE13].

Las conclusiones más relevantes obtenidas a través de esta validación arrojan que el modelo de la carga programado por medio de la herramienta de *Models* del ATP, muestra un correcto comportamiento de las señales de tensión y corriente al compararlo con un modelo de las mismas características, pero modelado con el software *NEPLAN*. Lo anterior muestra la validez del modelo programado, y verifica la correcta implementación del mismo, lo que lo hace confiable para su utilización.

Por otro lado, al realizar la comparación del modelo de impedancia constante implementado con los elementos propios del ATP (Resistencias e inductancias), y el modelo de la carga programado con la herramienta de *Models* y configurado como impedancia constante; se observó el mismo comportamiento para los dos casos, tanto en las señales de tensión y corriente en diferentes nodos del sistema. Lo anterior debido a que los

modelos comparados son ambos de impedancia constante implementados de forma distinta en el ATP.

Adicionalmente, se realizó un análisis de los efectos de la inyección de falla en la estabilidad de los modelos de la carga en el ATP/EMTP. En este trabajo se muestra la influencia que tiene el modelo de la carga en las señales de tensión (V) y corriente (I) medidas en los centros de generación en los estados de pre-falla y falla del sistema, analizando su estabilidad y correcto funcionamiento después de ocurrida una falla. Se seleccionó un sistema de prueba real en el cual se modeló un circuito base en el software ATP/EMTP con cargas modeladas como impedancia constante, y adicionalmente cuatro circuitos idénticos pero con modelos de carga distintos, programados por medio de la herramienta de *Models* del ATP. Como resultados de las pruebas, se realizó un análisis comparativo de las señales de V e I por fase medidas en los centros de generación. Los resultados muestran que las señales de tensión presentan una distorsión inicial después de ocurrida la falla, que luego se estabiliza. Adicionalmente, en pre-falla la señal de tensión no presenta distorsión y es estable. Finalmente, las señales de corriente tienen una forma estable para valores de pre-falla y falla, pero en falla la corriente es mayor. Así, se corrobora la estabilidad del modelo para su uso. También, se notan diferencias en la magnitud de las señales dependiendo del modelo de la carga utilizado. Este análisis es mostrado en el anexo A.2.

3.3.1.9. Influencia de los modelos de la carga en los localizadores “Modelado de cargas para localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida”

Un trabajo adicional se realizó para mostrar la influencia que tiene el modelado de la carga en el comportamiento de la tensión (V), corriente (I) e impedancias (Z) medidos durante los estados de pre-falla y falla del sistema en estado estable, en los centros de generación. El sistema de prueba es el circuito de distribución IEEE de 34 nodos de un nivel de tensión de 24.9 kV [IEEE34], modelado por medio del software ATP/EMTP, considerando modelos de carga como impedancia constante (Z_{cte}), corriente constante (I_{cte}), potencia constante (S_{cte}) y cargas híbridas compuestas de los tres modelos anteriores. Todas las cargas fueron codificadas usando la herramienta de *Models* del ATP. Como resultados de las pruebas, un análisis comparativo de las señales de tensión (V) y corriente (I) medidas y también de la impedancia (Z) vista desde el centro de generación fue realizado. Los resultados muestran que los modelos de la carga afectan el estado de falla del sistema de distribución, que directamente influye en el desempeño de los localizadores de falla, ya que estos usan las señales de tensión (V) y corriente (I) medidas en los centros de generación en estado de pre-falla y falla. Este trabajo fue condensado en [HERR12], y expuesto en el “*Transmission and Distribution Latin America Conference*”, realizado en septiembre de 2012, en la ciudad de Montevideo, Uruguay. A continuación se muestra la metodología propuesta, una parte de los resultados y las conclusiones más relevantes del mismo.

a. Metodología propuesta

La metodología propuesta se dividió en tres etapas. La primera etapa estuvo orientada al modelado del circuito usando el ATP/EMTP, el cual fue modelado con un caso base (cargas modeladas como Z_{cte} con los elementos propios del ATP). Adicionalmente, otros cinco modelos de carga fueron propuestos, modelados con la herramienta de *Models* del ATP (Z_{cte} , I_{cte} , S_{cte} , 80% I_{cte} más 20% Z_{cte} y el modelo híbrido del circuito IEEE34 [AGUE06], [IEEE34]).

La segunda etapa concierne a la simulación de fallas en los nodos del circuito con las diferentes resistencias de falla (R_f entre 0.5Ω y 40Ω), y para los diferentes tipos de falla [DEGE00]. Cuatro tipos de falla fueron simuladas: a) Falla monofásica (fase A), b) Falla bifásica (fases A-B), c) Falla bifásica-tierra (fases A-B-tierra) y d) Falla trifásica (fases A-B-C). Como resultado de la simulación, se obtiene una base de datos para las tensiones (V), corrientes (I) e impedancias (Z) en estado estable de pre-falla y falla, en los centros de generación [MORA06b].

Como último punto, la tercera etapa abarca el análisis comparativo de los modelos de la carga propuestos, por medio de la comparación de los resultados de la simulación. Así, se procede a realizar un análisis comparativo de los diferentes modelos de la carga a través de gráficos que permiten observar las diferencias entre el caso base (Z_{cte}) y los modelos de carga propuestos. Estos gráficos muestran la distancia a la cual ocurre la falla; la cual es medida con respecto a la subestación, la resistencia de falla tenida en cuenta en la simulación (R_f) y la diferencia que se presenta en porcentaje entre los modelos (error).

El error que se tuvo en cuenta para la comparación de la magnitud de los valores es el error relativo presentado en (3.35).

$$Error(\%) = \left(\frac{X_{Base} - X_{Cal}}{X_{Base}} \right) * 100 \quad (3.35)$$

Donde X_{Base} , es el valor de la señal (V, I o Z) medida del circuito base modelado como impedancia constante, con cargas propias del ATP. X_{Cal} , es el valor de la señal (V, I o Z) considerando los diferentes modelos de la carga.

b. Resultados y análisis comparativo

Los resultados más relevantes son los que se muestran en este análisis.

A. Análisis en estado de pre-falla

Las tensiones (V), Corrientes (I) e impedancias (Z) son iguales para todos los tipos de carga considerados en estado de pre-falla. En las figuras 3.19 y 3.20, se muestra el error porcentual obtenido con respecto al circuito base.

Para todas las gráficas se tomo la siguiente convención:

- ☆ Circuito con modelo de carga para Z_{cte} .
- ◇ Circuito con modelo de carga para I_{cte} .
- △ Circuito con modelo de carga para S_{cte} .
- Circuito con modelo de carga híbrido con 80% I_{cte} más 20% Z_{cte} [AGUE06].
- Circuito con modelo de carga híbrido tomado de la base de datos del circuito IEEE34 [IEEE34].

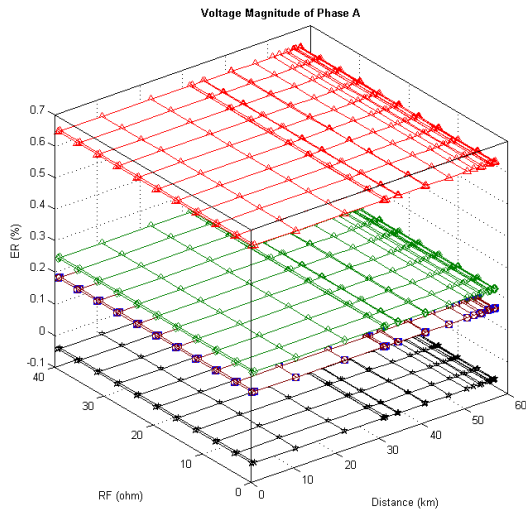


Figura 3. 19. Gráfico comparativo para magnitud de tensión de pre-falla en la S/E

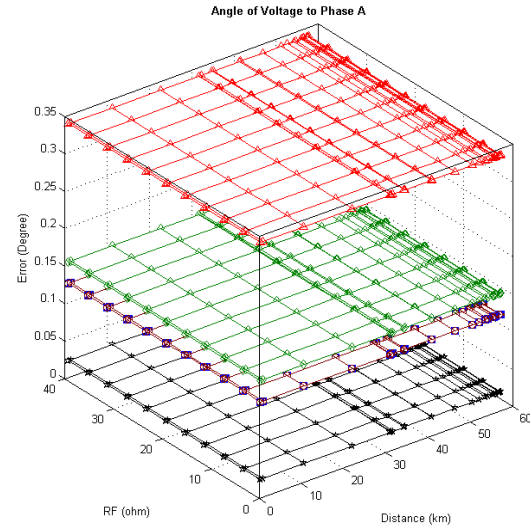


Figura 3. 20. Gráfico comparativo para ángulo de tensión de pre-falla en la S/E

De acuerdo a la figura 3.19, se puede notar que las diferencias mostradas por los cinco modelos presentan errores menores al 0.7% por encima del caso base; es decir, presentan valores levemente menores al valor base en el valor de la magnitud de tensión y son constantes en todos los valores. Para la figura 3.20, las diferencias presentadas en el ángulo son menores a 0.35 grados con respecto al caso base, presentando errores más pronunciados con el modelo correspondiente a S_{cte} , seguido por el modelo I_{cte} , luego los casos de los modelos híbridos y finalmente con errores de aproximadamente 0% en el caso del modelo Z_{cte} (como era de esperarse para este último caso).

B. Análisis en estado estable de falla

En este análisis se muestran los gráficos más representativos y que presentaron diferencias más notorias en los modelos del ATP (*Models*) con respecto a la propuesta de carga como Z_{cte} utilizando resistencias e inductancias.

a. Falla monofásica (Fase A):

En las figuras 3.21 y 3.22 se presentan algunos de los resultados más importantes para este tipo de falla. Solo se presenta este tipo de falla, pero en la referencia se puede encontrar el análisis completo para todas las fallas simuladas.

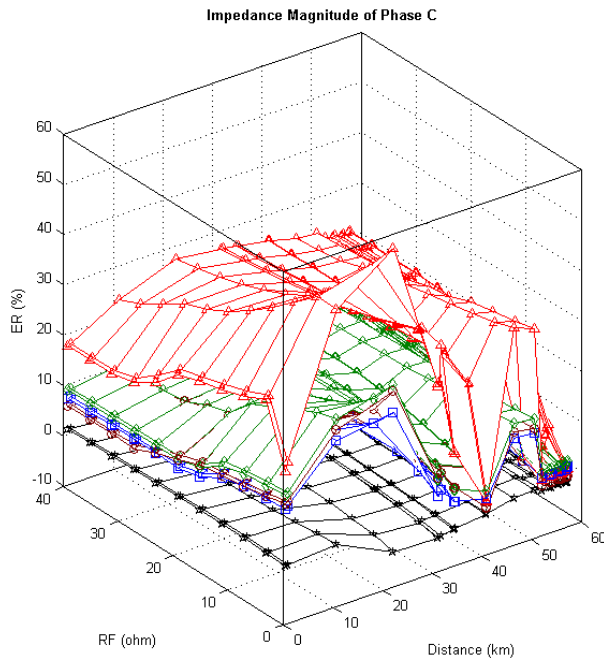


Figura 3. 21. Gráfico comparativo para magnitud de impedancia de falla en centro de generación distribuida

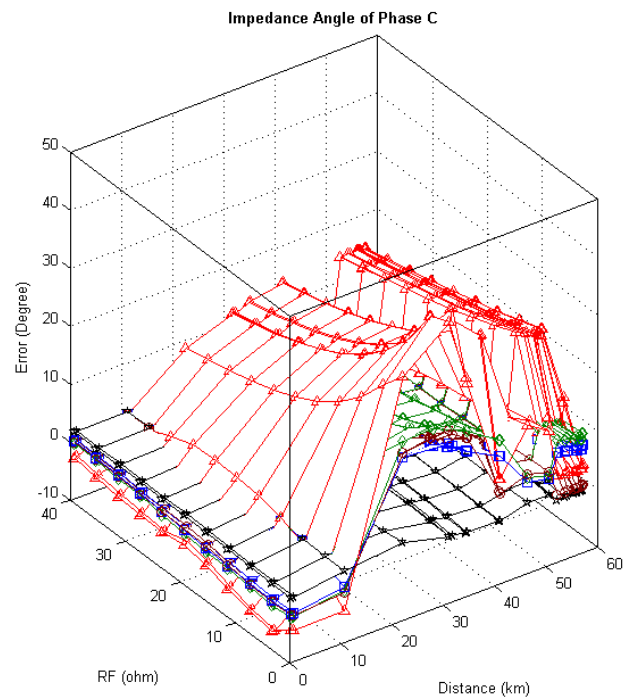


Figura 3. 22. Gráfico comparativo para ángulo de impedancia de falla en centro de generación distribuida

Considerando la magnitud de Z (Figura 3.21), se puede observar que el modelo con mayor diferenciación al caso base es el de S_{cte} , esto también se notó para las señales de tensión y corriente. Algunos modelos que también son relevantes son los de I_{cte} e híbridos. El modelo que menor error tiene es el de Z_{cte} . En la figura 3.22, se muestran las diferencias en el ángulo de Z en la fase C, donde el modelo de S_{cte} presenta una diferencia pronunciada en el ángulo y tiene un comportamiento similar a la magnitud de la impedancia.

c. Conclusiones

El modelo programado por medio de la herramienta de *Models* en ATP, reproduce de forma correcta el comportamiento de la carga ante diferentes tipos de falla. Como se demuestra por las simulaciones, el modelo que presenta el menor error con respecto al caso base es el de Z_{cte} . Esto se debe a que el circuito base también es de Z_{cte} , pero modelado con los elementos predefinidos que posee el ATPDraw. Además, los modelos propuestos reproducen de una forma adecuada el comportamiento del circuito y tienen errores relativamente pequeños en condiciones de pre-falla.

Adicionalmente, para los diferentes tipos de falla simulados se observa que la diferencia entre los modelos es similar de una falla a otra. La mayor diferencia, en la mayoría de los

casos, se presenta en el modelo de S_{cte} , seguido por el modelo de I_{cte} , después el modelo híbrido ($0.8I_{cte}$ más $0.2Z_{cte}$), luego el modelo híbrido IEEE34 y por último el que menor diferencia presenta (0% aproximadamente) es el modelo de Z_{cte} .

Los errores en la impedancia son el reflejo de la razón de las gráficas de V e I, y por tanto presentan diferencias más pronunciadas tanto en magnitud como en ángulo.

Finalmente, las diferencias en las medidas de V e I en los centros de generación, considerando los modelos de la carga propuestos, van a influir directamente sobre los localizadores de falla (MBM), pues estos se alimentan de las medidas de V e I en los centros de generación para realizar la estimación de la distancia de falla. Como una buena estimación del punto de falla es importante, se debe tener en cuenta el modelo de la carga al momento de modelar el sistema bajo estudio y también al realizar la localización de la falla.

3.3.1.10. Propuesta de índice de relación de impedancias a falla con localizadores “Un índice de relación de impedancia para predecir el desempeño del localizador de fallas teniendo en cuenta los diferentes modelos de carga”

Adicionalmente, un índice basado en la impedancia fue propuesto para predecir el comportamiento de los localizadores de falla (MBM), este trabajo es mostrado en [HERR13a].

a. Definición del índice de relación de impedancias a falla

La mayoría de los documentos de localización de fallas revisados presentan excelentes resultados en el error de estimación [MORA06a], [BEDO12b], [MORA08], [NOVO98] y [CHOI04]. Sin embargo, de acuerdo a las pruebas, el desempeño de los localizadores de falla depende fuertemente de la magnitud de potencia de carga del sistema y del modelo.

De acuerdo a lo expuesto, es importante definir un índice que ayude a hacer una predicción del desempeño del localizador en algún sistema de potencia. Así, se propone un índice de relación (α) basado en la impedancia, usando las medidas de tensión y corriente en estado estable de pre-falla. El índice de relación propuesto es definido como se describe en (3.36).

$$\alpha = \frac{\frac{1}{N} \text{abs} \left(\sum_{i=1}^N \frac{V_{i(S/E)}^p}{I_{i(S/E)}^p} \right)}{R_{fBase}} \quad (3.36)$$

Donde, $V_{i(S/E)}^p$ e $I_{i(S/E)}^p$ corresponden la tensión y corriente en la fase i medidas en la subestación en estado estable de pre-falla; N es el número de fases y R_{fBase} es el valor máximo esperado de resistencia de falla (40Ω).

El índice α describe la impedancia vista desde la subestación y realiza una comparación con la máxima resistencia de falla esperada. Un alto valor de α significa que la impedancia equivalente vista desde la subestación es más alta que la máxima resistencia de falla esperada. Por otro lado, si α es menor que uno, la impedancia vista desde la subestación es menor que la resistencia de falla base.

La información proporcionada por el índice α , ayuda a tener una predicción de la exactitud esperada por el localizador en algún sistema de distribución donde sea aplicado. Generalmente, cuando la impedancia vista desde la subestación es comparable con la resistencia de falla, es más difícil tener un alto desempeño en la localización de la falla, como se demuestra en las pruebas realizadas en este trabajo.

b. Pruebas de validación propuestas

El sistema de prueba usado es el circuito de distribución IEEE de 34 nodos de un nivel de tensión de 24.9 kV [IEEE34]. Cinco modelos de carga fueron propuestos, modelados con la herramienta de *Models* del ATP (Z_{cte} , I_{cte} , S_{cte} , 80% I_{cte} más 20% Z_{cte} y el modelo híbrido del circuito IEEE34 [AGUE06], [IEEE34]). Se realizaron variaciones de la carga y simulaciones de falla considerando diferentes resistencias de falla y diferentes tipos de falla. Tres tipos de falla fueron simuladas: a) Falla monofásica (fase A), b) Falla bifásica (fases A-B) y c) Falla trifásica (fases A-B-C).

Adicionalmente, se realizaron variaciones de carga aleatorias sobre cada modelo de la carga, a partir de la carga nominal ([100]%), y también incluyendo variaciones de baja carga ([10 – 30]%) y variaciones de alta carga ([135 – 145]%). Considerando estas variaciones sobre el sistema de prueba, el índice de relación de impedancia a falla (α) fue calculado.

Las resistencias de falla consideradas (R_f) en caso de fallas monofásicas a tierra varían entre 0 a 40 ohms, mientras en el caso de fallas entre fases estas varían entre 0 y 15 ohms [DEGE00], [DAS98].

Como resultado de la simulación de fallas, se obtiene una base de datos de tensión y corriente en la subestación en pre-falla y falla en estado estable. Luego, se realizó un análisis comparativo de los diferentes modelos de carga propuestos, usando el índice de relación (α) y un localizador MBM [BEDO12b], desarrollado en el grupo de investigación ICE³.

c. Análisis de los resultados obtenidos

La tabla 3.5 proporciona los valores del índice de relación de impedancia a falla (α), calculados para cada escenario definido por el modelo de carga considerado y la variación de la magnitud de la carga (3.36).

Modelo de carga	Carga del sistema de prueba		
	Carga nominal	Baja carga	Alta carga
Híbrido	11.060	59.673	7.445
Original IEEE 34	10.913	59.706	7.249
Scte	9.151	58.321	5.374
Icte	10.781	59.455	7.162
Zcte	12.170	59.791	8.577

Tabla 3. 5. Índice de relación de impedancia de falla (α) para el sistema de prueba considerando variación de la carga

Como se presenta en la tabla 3.5, para variación aleatoria de baja carga, un alto valor de α es obtenido (alrededor de 60), lo cual indica que la impedancia vista desde la subestación es mas alta que la $R_{f_{Base}}$. En el caso de la carga nominal, se obtuvieron valores intermedios de α (entre 9 y 12). Finalmente, para variación aleatoria de alta carga se estimaron valores bajos de α (entre 5 y 8.5).

Éstos resultados proporcionan información de la carga en el sistema de potencia analizado comparado con la máxima resistencia de falla posible. Así, para valores bajos de α , el circuito esta altamente cargado y por tanto el error en la localización de la falla será alto, y viceversa. Estos análisis se muestran detallados en el documento de referencia.

d. Resumen de las pruebas

Las tablas 3.6, 3.7, y 3.8 resumen el rango de errores presentados por las curvas de desempeño del localizador (MBM), considerando los diferentes modelos de la carga y magnitudes de carga analizadas. Los rangos de errores máximos están subrayados en cada tabla.

Como se predijo por el índice de rendimiento (α), las menores errores en la localización de falla son obtenidos en aquellos casos donde el sistema de prueba esta poco cargado. Considerando las incertidumbres en la magnitud de la carga de [10-30]%, el índice α varia de 58 a 60 lo que indica el alto desempeño esperado.

Así, cuando el sistema de alimentación está con poca carga, el valor de α es mayor que el obtenido en condiciones nominales, lo que indica que la impedancia vista desde la subestación es mayor que la resistencia de falla base. Entonces, tal como se obtiene en las curvas de rendimiento para el MBM, se observa una reducción en el error de estimación en la mayoría de los casos.

Por otra parte, cuando el sistema de alimentación está muy cargado [135-145]%, el valor de α fue ligeramente inferior al obtenido en condiciones nominales (Tabla 3.5). Cuando la tarea de localización de fallas se realizó, los errores fueron mayores que los obtenidos en condiciones nominales para todos los modelos de carga.

Finalmente, en el caso de carga trifásica y para las diferentes variaciones de carga, el error fue aproximadamente igual en todos los casos analizados. Este comportamiento se debe a la técnica de localización de fallas desarrollada, que utiliza componentes simétricas [BEDO12b], presentando un buen rendimiento.

Modelo de carga	Error (%) para el sistema de prueba a		
	Carga nominal 100 %	Baja carga	Alta carga
Híbrido	-3.8 ; 0.4	-2.4 ; 0.0	-4.0 ; 0.5
Original IEEE 34	-3.4 ; 0.0	-2.3 ; 0.0	-3.5 ; 0.0
Scte	-4.2 ; 0.0	-2.9 ; 0.0	-6.0 ; 8.0
Icte	-4.2 ; 0.8	-2.5 ; 0.0	-4.0 ; 1.0
Zcte	-2.7 ; 0.0	-2.2 ; 0.0	-3.5 ; 0.0

Tabla 3. 6. Error en la localización en el sistema de prueba IEEE de 34 nodos considerando falla monofásica

Load Model	Error (%) for power system at		
	Nominal load 100 %	Low load	High load
Híbrido	-1.5 ; 1.5	-1.6 ; 0.4	-1.6 ; 2.1
Original IEEE 34	-1.8 ; 1.8	-1.6 ; 0.4	-2.0 ; 3.5
Scte	-1.7 ; 2.3	-1.6 ; 0.4	-2.0 ; 5.2
Icte	-1.5 ; 1.5	-1.6 ; 0.5	-1.6 ; 2.1
Zcte	-1.4 ; 1.3	-1.5 ; 0.4	-1.5 ; 2.0

Tabla 3. 7. Error en la localización en el sistema de prueba IEEE de 34 nodos considerando falla bifásica

Load Model	Error (%) for power system at		
	Nominal load 100 %	Low load	High load
Híbrido	-1.5 ; 0.0	-1.6 ; 0.0	-1.4 ; 0.0
Original IEEE 34	-1.5 ; 0.0	-1.5 ; 0.0	-1.4 ; 0.2
Scte	-1.5 ; 0.0	-1.5 ; 0.0	-1.5 ; 1.2
Icte	-1.5 ; 0.0	-1.6 ; 0.0	-1.4 ; 0.0
Zcte	-1.5 ; 0.0	-1.6 ; 0.0	-1.4 ; 0.0

Tabla 3. 8. Error en la localización en el sistema de prueba IEEE de 34 nodos considerando falla trifásica

e. Conclusiones

El modelo de la carga codificado usando los *Models* del ATP, reproduce adecuadamente el comportamiento del sistema de alimentación considerando diferentes tipos de fallas como fue demostrado por las simulaciones realizadas en este documento de investigación.

Un nuevo índice de relación basado en la impedancia de falla fue propuesto y validado, para obtener información de la representatividad de la carga del sistema respecto a una resistencia de falla predefinida ($R_{f_{Base}}$), que en este caso es la máxima resistencia de falla

esperada. El índice α da una adecuada indicación del desempeño esperado para el localizador considerando la incertidumbre asociada a los escenarios de carga propuestos.

El índice propuesto fue probado considerando una base compuesta por 7290 fallas para el sistema IEEE de 34 nodos e incertidumbres como la variación de la carga, el tipo de falla y las resistencias de falla. Como se esperaba y de acuerdo a las pruebas de desempeño, para bajos valores de α , el rendimiento del MBM es bajo y viceversa.

Adicionalmente, modelos de la carga no considerados previamente en la mayoría de documentos técnicos de localización de fallas, son ahora incluidos como un nuevo factor que influencia el desempeño de los MBM.

Finalmente, la consideración de modelos de cargas reales ayuda a mejorar la eficiencia del localizador, y por otro lado, el índice de desempeño propuesto ayuda a tener una buena estimación del comportamiento esperado, proporcionando herramientas útiles para mejorar la calidad de la energía entregada al usuario final.

Como trabajo adicional, este modelo de la carga fue usado en diferentes trabajos propuestos por el grupo de investigación, como en [OROZ12], donde se expone un método robusto para localización de fallas monofásicas considerando generación distribuida y compensación de corriente. También en [HERR13b], donde se propone un modelo robusto para localización de fallas en sistemas de distribución, considerando generación distribuida e incertidumbre en la carga, entre otros.

3.4. Modelado de fuentes

De acuerdo a la información suministrada en los aspectos teóricos sobre las características de la fuente, en ATPDraw se verificaron las características buscadas para la implementación de la fuente de tensión. Se encontró que la fuente “AC source (1&3)” cumple con estas características. Para el modelamiento de sistemas eléctricos AC trifásicos se utiliza este tipo de fuente.

3.4.1.AC source (1&3):

Esta fuente tiene la opción de seleccionar el tipo de fuente según sea de voltaje o corriente. Adicionalmente, permite seleccionar el número de fases, ya sea monofásica (single), trifásica balanceada (3-phase), o trifásica desbalanceada (3*1-phase). Además, se puede seleccionar las unidades del ángulo de desfase, ya sea en grados (Degree) o segundos (Seconds); también la amplitud de la señal, que puede ser en valor pico línea a tierra (Peak L-G), RMS línea a tierra (RMS L-G) o en valor RMS línea a línea (RMS L-L). Por ultimo, permite seleccionar si la fuente se encuentra o no conectada a tierra (Grounded o Ungrounded). En la figura 3.23 se muestra la ruta de acceso para este modelo de fuente y su respectiva ventana de datos.

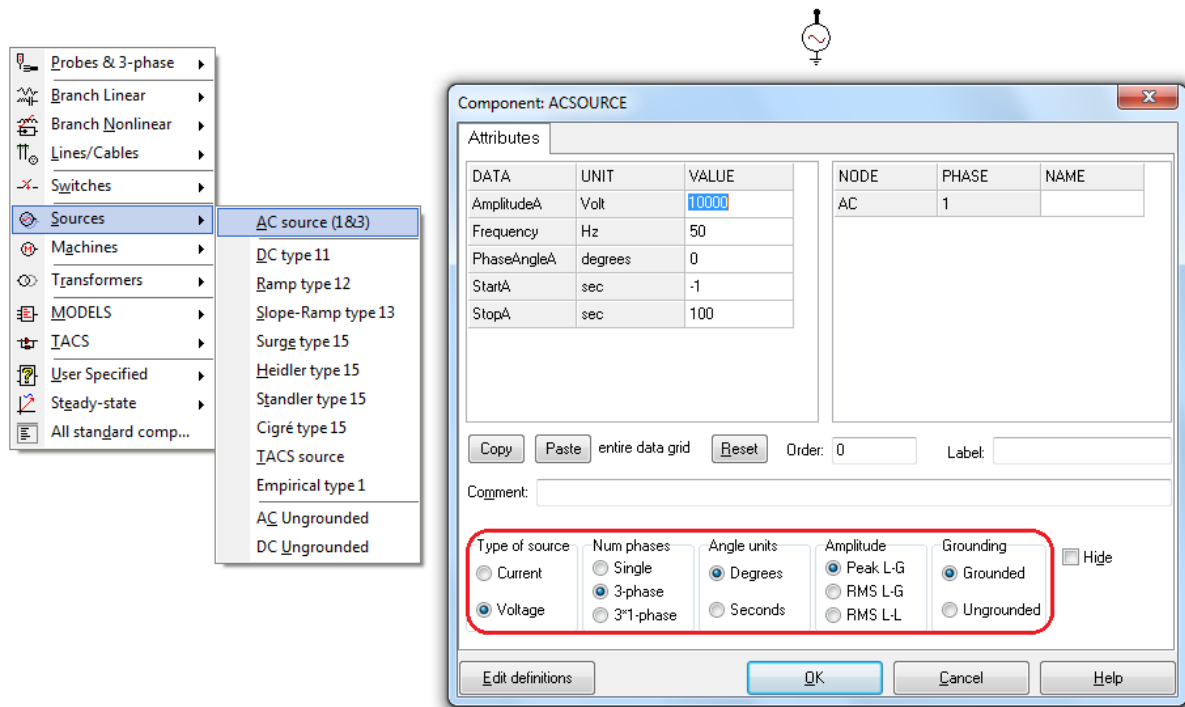


Figura 3. 23. Ruta de acceso para el modelo de fuente “AC source (1&3)” y su respectiva ventana de datos

En la figura anterior, en el cuadro se encuentran los las diferentes características de la fuente, mencionadas previamente y que se pueden seleccionar. Adicional para esta fuente se deben especificar los siguientes datos.

- *Amplitude*: El valor pico de la fase correspondiente en amperios o voltios de la función.
- *Frequency*: Frecuencia [Hz].
- *PhaseAngle*: Desfase en grados o segundos para la fase correspondiente.
- *Star*: Tiempo de inicio (segundos) para la fase.
- *Stop*: Tiempo final (segundos) para la fase.

En la opción “Help” de la ventana del modelo se puede encontrar mas información sobre este tipo de fuente.

En la figura 3.24 se presenta el esquema utilizado para confirmar que la fuente no presenta potencia infinita.

Los resultados obtenidos por medio de esta prueba muestran que el modelo de la fuente, garantiza caídas de tensión en el evento de una falla de cortocircuito. Para mostrar esto, en la figura 3.25 se muestra la tensión eficaz durante un periodo de 1 s, para el caso de una falla trifásica a los 250ms y se despejó a los 500ms en la ubicación mostrada en la figura 3.24.

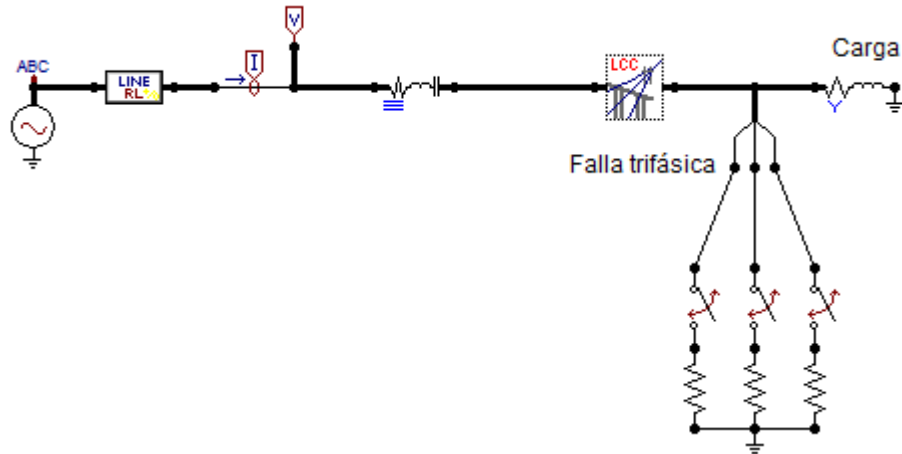


Figura 3. 24. Circuito de prueba para el modelo de fuente trifásica

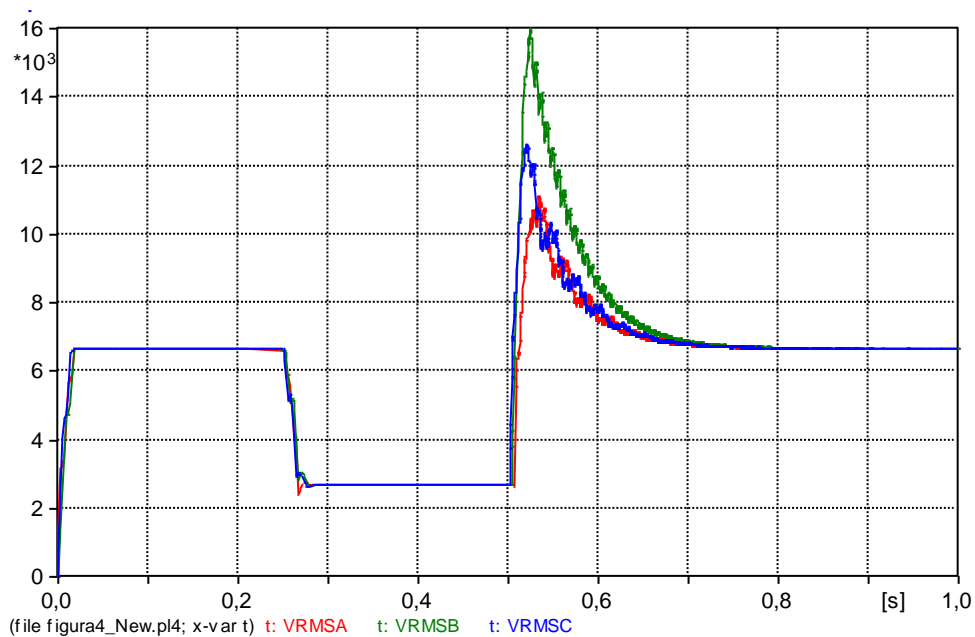


Figura 3. 25. Tensión eficaz en terminales de la fuente cuando ocurre una falla 3ϕ .

Como se puede observar en la figura 3.25 la fuente de voltaje no presenta una potencia infinita, presentando un comportamiento que se ajusta a la realidad.

Ahora bien, es importante resaltar que en la mayoría de los casos, la información suministrada referente a la impedancia de Thevenin del circuito externo es entregada por la empresa distribuidora de energía. Aunque, hay diferentes métodos en la literatura para calcular el equivalente de Thevenin.

Algunos estudios como en [AREF07], proponen un algoritmo iterativo para la determinación de los parámetros del circuito equivalente, en este caso, calculando valores de fuente e impedancia equivalente. Se puede aplicar la estimación por mínimos cuadrados, para mejorar la exactitud del método, reduciendo el error de cálculo causado por los ruidos

en las medidas. Por medio de este método se estiman los parámetros del circuito equivalente del sistema, usando medidas locales para un punto de acople común. Las ventajas de este algoritmo comparado con otros, es que este método no depende del modelo de la carga y también que no necesita tener medidas sincronizadas. El único requerimiento para este método son los valores RMS de voltaje, corriente y factor de potencia.

Otros autores como en [ANDR07], utilizan técnicas no invasivas para determinar los parámetros de la red. Los autores proponen una nueva técnica que mejora la exactitud de la identificación no invasiva del sistema. Se proponen dos técnicas, la primera es el algoritmo de re-muestreo coherente (resampling coherent algorithm), y el segundo es el algoritmo de cálculo de sobreseñal completo (signal envelope calculation algorithm).

Debido a que como se mencionó anteriormente, los valores de la impedancia de Thevenin son entregados por la empresa distribuidora de energía, no se realizó profundización en este tipo de técnicas para el cálculo de la impedancia de Thevenin.

3.4.2. Esquema final de la fuente

Finalmente, el esquema usado para el modelo del circuito antes de la conexión con los tramos de líneas sigue el siguiente orden:

- *Fuente*: En este caso se utiliza la fuente trifásica AC source (1&3) expuesta anteriormente.
- *Referencia ABC*: Este componente se encuentra en el ATP/EMTP en la ruta Probes & 3-phase/ABC Reference, y define la secuencia de las fases del circuito.
- *Impedancia de Thevenin del circuito externo*: Se deben introducir los valores de secuencia de la impedancia de Thevenin del circuito externo.
- *Transformador*: Se debe ingresar el tipo de conexión del transformador que se tiene en la subestación y además especificar si es aterrizado o no. Estas especificaciones son necesarias, pues el tipo de transformador que se tenga y su conexión van a influir en el comportamiento del circuito ante una falla.
- *Medidores de tensión y corriente*: Estos medidores son definidos para tomar las medidas de tensión y corriente en la subestación de distribución que usan los localizadores de falla.
- *Impedancia RLC*: Esta impedancia es adicionada después de los medidores, pues el programa de ATP/EMTP no permite la conexión directa de los medidores con las líneas. El valor de esta impedancia es despreciable y es ingresado de forma automática en la creación de la plantilla.

En la figura 3.26 se observa un esquema en ATPDraw de cómo será el modelo del circuito antes de la conexión de las líneas y las cargas.

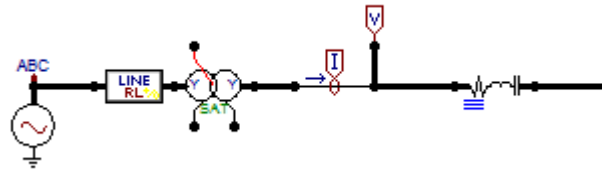


Figura 3. 26. Esquema usado para el modelo del circuito antes de la conexión con las líneas y cargas.

3.5. Modelado de líneas

Como se expuso en la sección dos de aspectos teóricos el modelado de las líneas de distribución está muy bien definido en el ATP/EMTP, pudiendo simular diferentes tipos de líneas dependiendo de la aplicación que se desee realizar. En este caso para el estudio de localización de fallas en sistemas de distribución usando técnicas basadas en el modelo y técnicas basadas en el conocimiento, son necesarias las mediciones de estado estable de las señales de tensión y corriente. Así pues, modelos de línea demasiado elaborados no son necesarios, pues no se poseen todos los datos solicitados que influyen principalmente los transitorios de las señales.

Ahora bien, de acuerdo a los estudios y experiencias obtenidas en el grupo de investigación ICE³, y a la información contenida en los aspectos teóricos, los modelos de línea seleccionados fueron el modelo *LCC* en su versión *pi*, ya que permite incluir los valores de los datos de acuerdo al conductor y la configuración de la línea con la distribución geométrica de los conductores; y también, el modelo de parámetros concentrados *RLC pi equivalente*, ya que en algunos casos se posee información de los valores de la matriz de impedancia. Además, las líneas consideradas son de distribución, donde las longitudes tomadas son medias y cortas.

3.5.1. Longitud del tramo de la línea

Adicionalmente, es importante a la hora de ingresar los datos de la línea tener en cuenta la longitud del conductor en el vano. Así, con respecto al dato que concierne a la longitud del tramo de línea correspondiente entre el nodo inicial y final, es importante destacar que para realizar un mejor modelado del circuito se debe considerar la longitud del conductor que se tiene en el tramo; es decir, teniendo en cuenta la flecha que pueda tener el conductor a lo largo del tramo. Para esto se propone usar las ecuaciones correspondientes a vanos nivelados y desnivelados y así hallar una longitud más aproximada del conductor que se encuentra en el tramo. La aproximación usada es la correspondiente al método de la parábola, esta es válida para flechas menores al 5% del vano ($D < 0.05 \cdot S$). Lo anterior, se

hace considerando que en la mayoría de los casos, solo se posee la longitud horizontal topográfica entre los nodos del tramo de línea.

a. Vanos nivelados

Para vanos nivelados se tiene el esquema de la figura 3.27.

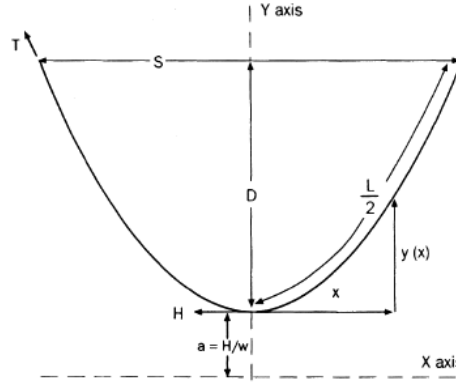


Figura 3. 27. Esquema para vanos nivelados

Ahora bien, aplicando el método de la parábola se obtiene que el valor de la longitud total del vano viene dada por la ecuación (3.37).

$$L = s + \frac{\omega^2 s^3}{24H^2} \quad (3.37)$$

Dónde:

- L : Longitud total del conductor en el tramo respectivo en [km].
- s : Longitud horizontal del vano entre las estructuras en [km].
- ω : Peso del conductor en [kg/km].
- H : Tensión de trabajo diario o promedio en [kgf].

b. Vanos desnivelados

La figura 3.28 muestra un esquema para este tipo de vanos:

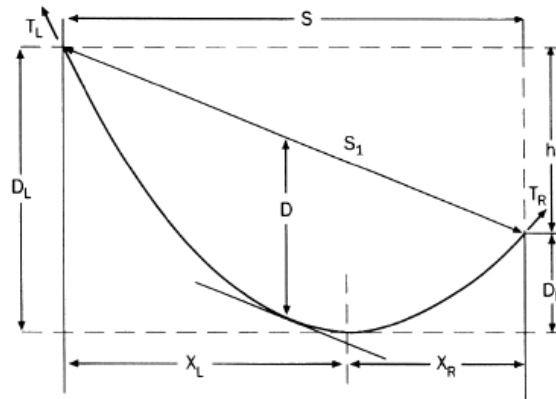


Figura 3. 28. Esquema para vanos desnivelados

Cuando se aplica la aproximación por medio del método de la parábola se llega a las expresiones que se muestran ecuaciones (3.38), (3.39) y (3.40):

$$X_R = \frac{s}{2} + \frac{h \cdot H}{\omega \cdot s} \quad (3.38)$$

$$X_L = \frac{s}{2} + \frac{h \cdot H}{\omega \cdot s} \quad (3.39)$$

$$L = s + (X_R^3 + X_L^3) \frac{\omega^2}{6H^2} \quad (3.40)$$

Dónde:

X_R, X_L : Longitud derecha (izquierda) horizontal del vano, medida desde el punto mínimo de la parábola formada por el conductor en [km].

L : Longitud total del conductor en el tramo respectivo en [km].

s : Longitud horizontal del vano entre las estructuras en [km].

ω : Peso del conductor en [kg/km].

H : Tensión de trabajo diario o promedio en [kgf].

Con las expresiones anteriores para vanos nivelados y desnivelados se halla el valor de la longitud del conductor en el tramo y este es introducido en el dato de la longitud de la línea para tener una mejor aproximación al circuito real.

Finalmente, la tensión promedio del conductor se toma como la condición de trabajo diario que corresponde a la condición que se presenta con más frecuencia. La tensión de trabajo diario se estima como un porcentaje de la tensión de rotura del cable, entre el 18% y 22%, de acuerdo con la resolución CREG 025 de 1995 [CREG95]. Para este caso se toma como el 20% de la tensión de rotura.

3.6. Modelado de los transformadores

Al igual que los modelos anteriores, el modelo del transformador está muy bien definido en el ATP/EMTP. El modelo de transformador más completo es el modelo híbrido XFMR, el cual es usado en muchos estudios de transitorios de energización de transformadores; pero en este caso para los estudios de estado estable de localización de fallas en sistemas de distribución, donde son necesarios los valores de tensión y corriente de estado estable en la subestación no es necesario. El transformador usado en este caso es uno *saturable*, el cual presenta buenos comportamientos de las señales en estado estable, y permite manejar al igual que el modelo híbrido las conexiones de los devanados del transformador. Finalmente, los transformadores saturables requieren, además de la relación de transformación entre espiras, los parámetros de impedancia tanto en el primario como en el

secundario, grupo de conexión, ángulo de desfase y la resistencia de la rama de magnetización (Ver figura 2.13).

Adicionalmente, para verificar el comportamiento del transformador saturable en estado estable y observar que no presentara diferencias en estado estable con el transformador XFMR, se tomo el circuito IEEE de 34 nodos, en el cual se modelo el transformador de la subestación con un transformador híbrido XFMR que necesita mas datos para su funcionamiento; y el transformador saturable. Luego se simulo falla trifásica en uno de los nodos del sistema y se observaron los valores de estado estable de las señales de tensión y corriente en estado de pre-falla y falla. La figura 3.29 (a), muestra el esquema de la subestación del circuito IEEE de 34 nodos modelando con el transformador híbrido XFMR y la figura 3.29 (b) muestra el mismo esquema, pero modelado con el modelo de transformador saturable.

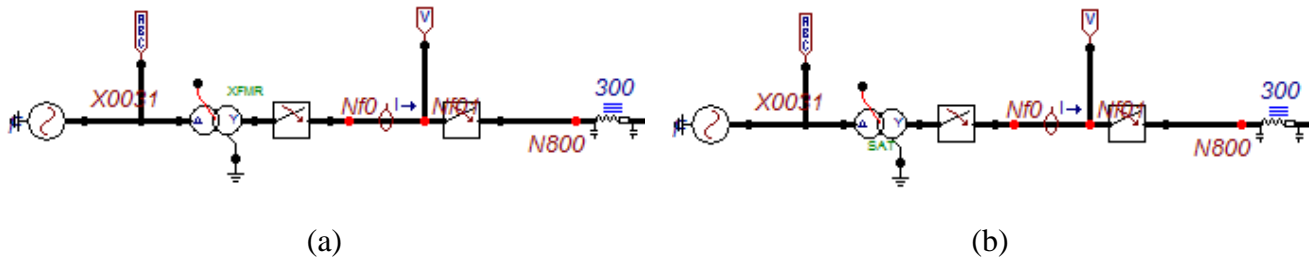


Figura 3. 29. (a). Esquema de la subestación del circuito IEEE de 34 nodos modelando con el transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con el transformador saturable.

La figura 3.30 (a) muestra las señales de tensión en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR; y la figura 3.30 (b) muestra la misma señal de tensión pero modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.

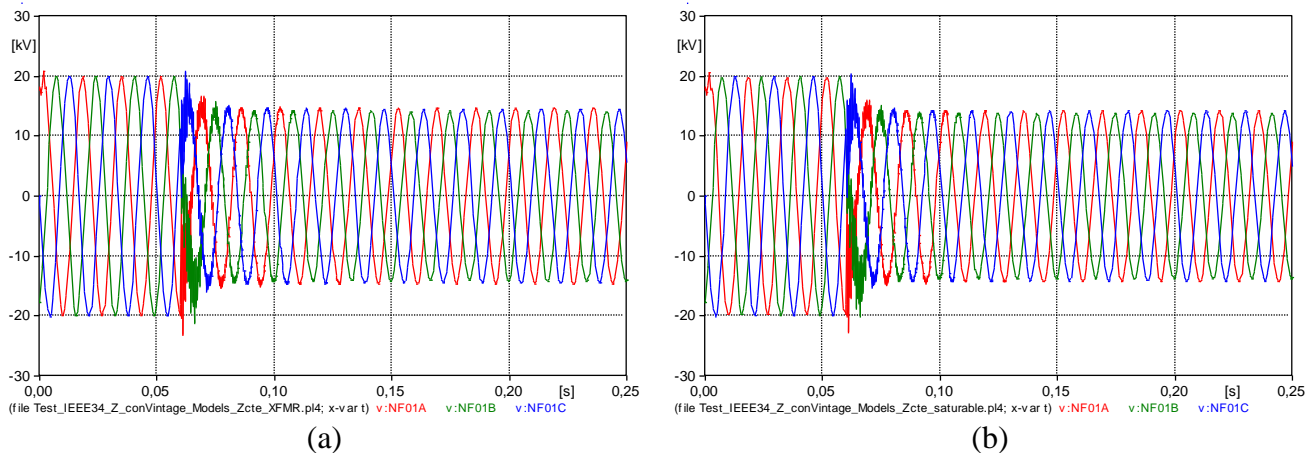


Figura 3. 30. (a). Señales de tensión en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.

La figura 3.31 (a) muestra las señales de corriente en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR; y la figura 3.31 (b) muestra la misma señal de corriente pero modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.

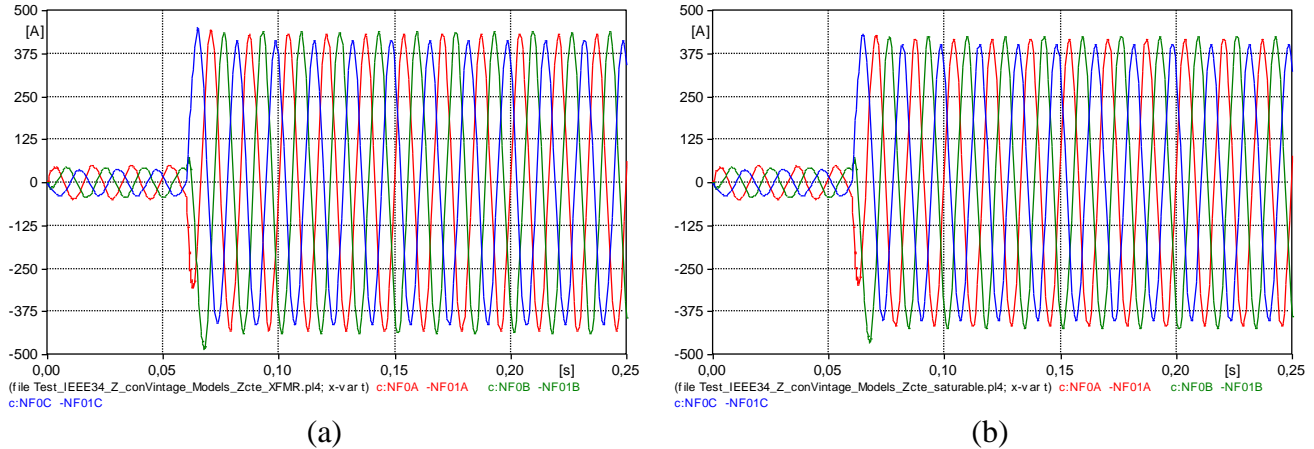


Figura 3. 31. (a). Señales de corriente en la subestación, modelando con un transformador híbrido XFMR. (b). Modelando con un transformador saturable, en estado estable de pre-falla y falla del sistema, después de ocurrida una falla trifásica en el nodo 828.

Ahora bien, en la Tabla 3.9 se muestran los valores de estado estable de las señales de tensión y corriente, tanto en magnitud como en ángulo, en estado de pre-falla y falla, con el circuito modelado con el transformador híbrido XFMR y el transformador *saturable*.

Transformador		Pre-falla				Falla			
		Tensión		Corriente		Tensión		Corriente	
		Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
Híbrido XFMR	Fase A	14022	58,21	34,448	29,89	10341,0	39,11	304,76	9,44
	Fase B	14081	-61,41	30,864	-86,85	9979,3	-80,25	308,96	-113,72
	Fase C	14191	178,79	26,529	156,31	10300,0	161,11	291,54	127,51
Saturable	Fase A	13955	58,383	34,283	30,05	10037	41,421	295,78	11,739
	Fase B	14019	-61,265	30,729	-86,707	9703,8	-77,8	300,38	-111,3
	Fase C	14135	178,89	26,419	156,42	10026	163,37	283,81	129,79

Tabla 3. 9. Valores de estado estable de las señales de tensión y corriente, tanto en magnitud como en ángulo, en estado de pre-falla y falla, con el circuito modelado con el transformador híbrido XFMR y el transformador *saturable*.

Los resultados muestran que el comportamiento del sistema en estado estable no se ve afectado al simular con uno u otro transformador; las diferencias entre las mediciones son menores al 3% en magnitud y ángulo de fase, por tanto se tomo la opción de simulación más sencilla y que presenta un buen comportamiento en las señales para realizar los

estudios de localización de fallas en sistemas de distribución, en este caso el modelo de transformador *saturable*.

3.7. Parámetros de los elementos del circuito que influyen en la localización de fallas en sistemas de distribución.

Luego de realizar el modelado y la selección de los elementos principales para representar el circuito de distribución, y de los diferentes análisis y estudios realizados en los mismos. Adicionalmente, teniendo en cuenta los diferentes estudios y herramientas desarrollados por el grupo de investigación [MARI13], se seleccionaron los parámetros más representativos de los elementos simulados (cargas, fuentes y líneas), que influyen en el modelo del sistema y por consiguiente influyen en los localizadores de fallas. Los parámetros seleccionados fueron los siguientes:

- El modelo de la carga, ya sea impedancia constante (Z_{cte}), corriente constante (I_{cte}), potencia constante (S_{cte}) o un modelo híbrido.
- La variación de la magnitud de la carga: Como se observó en la validación del modelo de la carga, la magnitud de la carga influye directamente en el desempeño de los localizadores.
- El valor de la magnitud de la fuente: Este valor influye en las señales de tensión que son usadas por los localizadores.
- La longitud del conductor: Este parámetro influye en la impedancia de la línea, por lo que se esperaba que influyera en los localizadores. Adicionalmente, el valor de la longitud de la línea, en algunos casos es un valor en el cual se tiene cierta incertidumbre, ya sea que las bases de datos de las líneas tengan errores, o no se hayan tenido en cuenta valores de la flecha en la longitud del conductor de la línea.

Capítulo 4

4. Aplicación de la metodología propuesta

4.1. Introducción

Como el objetivo principal de este proyecto de grado es, modelar circuitos de distribución con la metodología de modelado propuesta en el capítulo tres; y realizar variaciones a los parámetros de los modelos de la línea, de la carga y de la fuente, y analizar su influencia en localizadores de falla. Por tanto, este capítulo se dedica a presentar las pruebas de sensibilidad realizadas al variar los parámetros de los diferentes elementos propuestos en la metodología, y a mostrar los diferentes análisis y resultados obtenidos.

Referente al contenido, en la sección dos se describen los circuitos de prueba. La sección tres está dedicada a presentar los resultados de las pruebas realizadas y los análisis de sensibilidad con los localizadores (MBM y MBC); en esta sección se muestra la descripción del análisis, el análisis de sensibilidad para cada circuito con los diferentes localizadores y los resultados obtenidos.

4.2.Descripción de los circuitos de prueba

Para la aplicación de la metodología, se eligieron dos circuitos de prueba, los cuales fueron modelados siguiendo las indicaciones propuestas en la metodología. Estos circuitos se describen a continuación.

4.2.1. Circuito IEEE de 34 nodos

Este es un sistema de prueba real localizado en Arizona U.S.A con un nivel de tensión de 24.9 kV. Este sistema de distribución posee laterales monofásicos y trifásicos, cargas desbalanceadas y secciones de líneas con diferentes configuraciones y longitudes. Es importante anotar que en este caso los reguladores de tensión no son incluidos y que el transformador conectado a una carga trifásica ubicada en el nodo 832, fue representado junto con la carga como una impedancia equivalente en ese nodo. Este sistema de prueba fue modelado usando el ATP/EMTP y el bloque de la carga implementado con la herramienta de *Models*, para obtener los diferentes modelos de carga propuestos.

Cada uno de los nodos está definido por las líneas del sistema de distribución y las cargas conectadas en el sistema. Los parámetros eléctricos, la configuración de cada línea y la carga conectada en cada nodo se muestran en [IEEE34].

La figura 4.1 muestra el sistema de prueba IEEE de 34 nodos como es presentado por ATPDraw con las cargas modeladas usando la herramienta de *Models* del ATP.

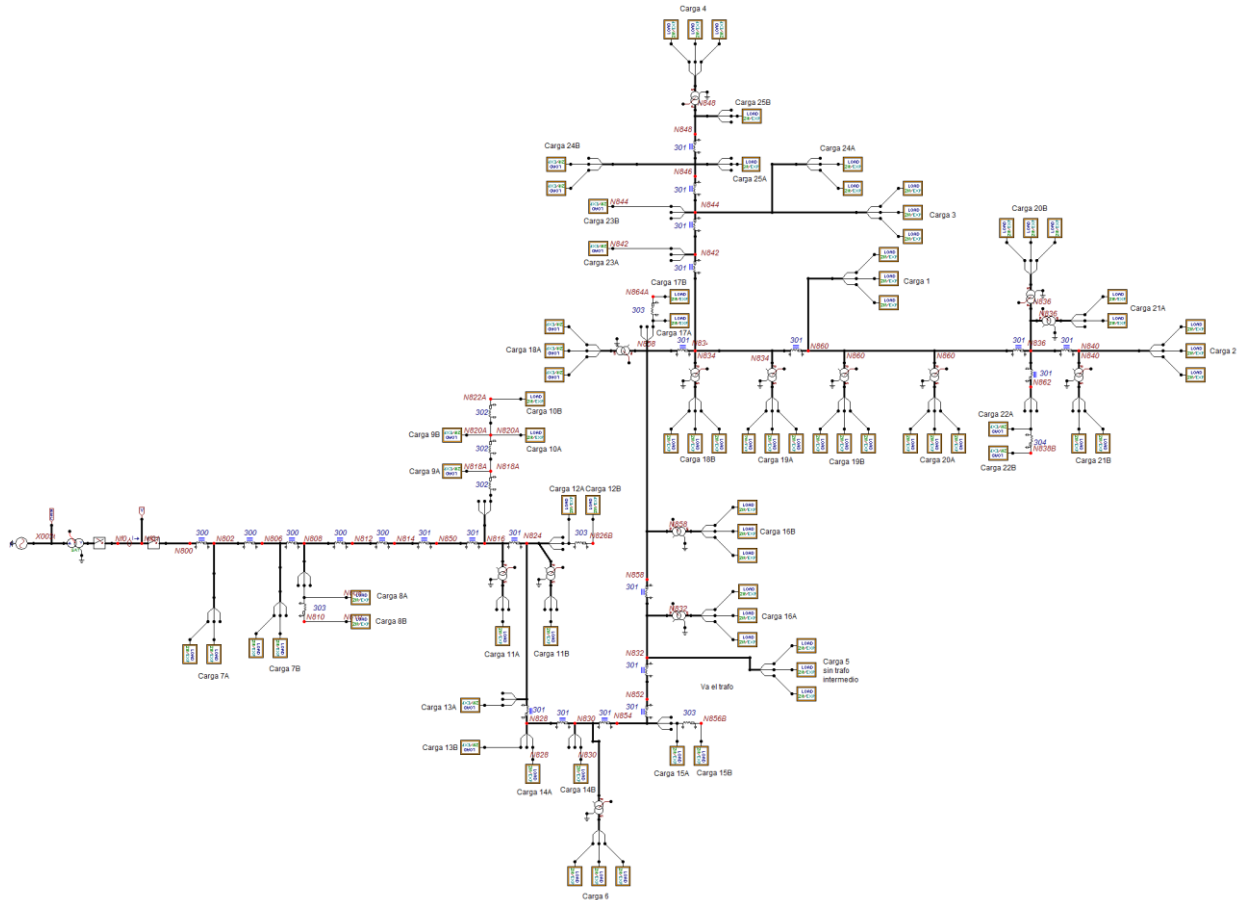


Figura 4. 1. Sistema de prueba IEEE de 34 nodos como es presentado por ATPDraw, con las cargas modeladas con el bloque de la carga implementado

4.2.2. Circuito real tomado de una empresa de distribución (Circuito P2)

Este circuito, es un sistema de prueba diseñado a partir de datos reales tomados de una de una empresa de distribución adscrita al grupo de investigación ICE³. Posee un nivel de tensión de 34.5 kV, es trifásico y posee deferentes cargas conectadas a lo largo del circuito. Este sistema fue modelado al igual que el anterior, usando el ATP/EMTP y el bloque de la carga implementado con la herramienta de *Models* del ATP. Los tramos de líneas fueron simulados usando el bloque LCC, para simular líneas aéreas con la configuración geométrica de los conductores.

En este caso los parámetros eléctricos, la configuración de cada línea y la carga conectada en cada nodo no se muestran, debido a la confidencialidad de la información.

Finalmente, la figura 4.2 muestra el sistema de prueba P2 como es presentado por ATPDraw con las cargas modeladas usando la herramienta de *Models* del ATP.

cuales se tienen: i) el tipo de falla, ii) el nodo de falla o distancia a la cual ocurre la falla y iii) la resistencia de falla.

Se considera el análisis para tres tipos de falla: a) Falla monofásica (fase A), b) Falla bifásica (fases A-B) y c) Falla trifásica (fases A-B-C). Las resistencias de falla consideradas (R_f) en caso de fallas monofásicas a tierra varían entre 0 a 40Ω , mientras en el caso de fallas entre fases estas varían entre 0 a 15Ω [DEGE00], [DAS98]. Se desea analizar la posible influencia de cada escenario en los localizadores.

c. Condición Nominal

La condición que se define como nominal para el análisis de sensibilidad considera:

Tensión	Tensión nominal del circuito
Línea	Longitud real de las líneas
Magnitud de la carga	Carga promedio
Modelo de la carga	Impedancia constante (Z_{cte})

Tabla 4. 1. Condición nominal de los circuitos de prueba

d. Escenarios planteados

Para realizar el análisis de sensibilidad se determinaran diferentes escenarios o situaciones semejantes a la realidad, en donde cada situación es representada por un circuito modificado en base al circuito ante condiciones promedio o nominales. Las variaciones realizadas a cada circuito de donde se obtienen los escenarios a ser estudiados, se obtienen por medio de una herramienta automática de variación desarrollada por el grupo de investigación ICE³ [MARI13]. Adicionalmente, los modelos de la carga estudiados fueron implementados usando el bloque de carga desarrollado por medio de la herramienta de *Models* del ATP/EMTP.

Los escenarios de modelos de la carga para el sistema de prueba IEEE de 34 nodos, modelados con la herramienta de *Models* del ATP son Z_{cte} , I_{cte} , S_{cte} , 80% I_{cte} más 20% Z_{cte} (Híbrido) y el modelo híbrido del circuito IEEE34 (Original IEEE 34) [AGUE06], [IEEE34]. Ahora bien, los escenarios de modelos de la carga para el sistema de prueba P2 son Z_{cte} , I_{cte} , S_{cte} y 80% I_{cte} más 20% Z_{cte} (Híbrido) [AGUE06].

Es importante anotar, que para cada escenario de modelo de la carga planteado en cada circuito de prueba, se realizaron las variaciones en la magnitud de la carga propuestas; mientras que para las variaciones de la magnitud de la fuente y de la longitud de los conductores, las variaciones se realizaron a los escenarios de modelo de la carga de impedancia constante (Z_{cte}) y el modelo de potencia constante (S_{cte}).

Así, las variaciones propuestas para cada sistema de prueba se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

Escenarios planteados para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos		
Escenario	Modelo de la carga	Rango de variación con respecto al nominal
Carga 1	Híbrido	
	Original IEEE 34	
	Scte	[10- 30]%
	Icte	
	Zcte	
Carga 2	Híbrido	
	Original IEEE 34	
	Scte	[60 – 100]%
	Icte	
	Zcte	
Carga 3	Híbrido	
	Original IEEE 34	
	Scte	[135- 145]%
	Icte	
	Zcte	
Carga 4	Híbrido	
	Original IEEE 34	
	Scte	[10- 145]%
	Icte	
	Zcte	
Tensión	Scte	[0,95 -1,05] p.u
	Zcte	
Línea 1	Scte	[95 – 98]%
	Zcte	
Línea 2	Scte	[98 – 102]%
	Zcte	
Línea 3	Scte	[102 – 105]%
	Zcte	
Línea 4	Scte	[95 – 105]%
	Zcte	

Tabla 4. 2. Escenarios planteados para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos

Escenarios planteados para el circuito de prueba P2		
Escenario	Modelo de la carga	Rango de variación con respecto al nominal
Carga 1	Híbrido	[30- 60]%
	Scte	
	Icte	
	Zcte	
Carga 2	Híbrido	[80 - 100]%
	Scte	
	Icte	
	Zcte	
Carga 3	Híbrido	[110- 130]%
	Scte	
	Icte	
	Zcte	
Carga 4	Híbrido	[30- 60]%
	Scte	
	Icte	
	Zcte	
Tensión	Scte	[0,95 -1,05] p.u
	Zcte	
Línea 1	Scte	[95 – 98]%
	Zcte	
Línea 2	Scte	[98 – 102]%
	Zcte	
Línea 3	Scte	[102 – 105]%
	Zcte	
Línea 4	Scte	[95 – 105]%
	Zcte	

Tabla 4. 3. Escenarios planteados para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos

La variación de la carga consiste en la variación de la magnitud de potencia tanto activa como reactiva de cada una de las fases de una determinada carga. La variación se realiza en un porcentaje aleatorio en el rango especificado, teniendo en cuenta una variación aleatoria en el factor de potencia entre 0.81 a 0.97 en todos los casos. La magnitud de la tensión se varió aleatoriamente en el rango especificado. Finalmente, se realizó la variación aleatoria de la longitud del conductor de cada uno de los tramos de línea nominal que componen el circuito bajo prueba.

Estas variaciones se realizaron considerando que los datos del circuito pueden variar, ya sea porque no se conoce su valor exacto o porque en algún momento los datos obtenidos para la simulación del circuito pueden tener cierta diferencia.

En total se tienen 30 escenarios de variaciones para el circuito de prueba IEEE de 34 nodos y 26 escenarios de variaciones para el circuito de prueba P2, más el escenario de comparación a condición nominal o promedio para cada uno de los sistemas de prueba. Para cada escenario se realiza una simulación automática de fallas, considerando 11 resistencias de fallas diferentes que oscilan en un rango de 0Ω a 40Ω , para fallas a tierra y para las fallas entre fases varían en un rango de 0Ω a 15Ω ; también considerando el número de nodos del circuito y tres tipos de fallas (monofásica, bifásica y trifásica) [MORA06b], [MARI13]. Así, el número total de fallas que se obtuvieron para realizar los análisis de acuerdo a cada circuito se muestran en la tabla 4.4.

Circuito	Número de descriptores obtenidos por circuito
Sistema de prueba IEEE de 34 nodos	32736
Circuito P2	39204

Tabla 4. 4. Número de registros de falla simulados o descriptores de falla obtenidos para cada uno de los circuitos de prueba.

La base de datos de descriptores se obtuvo en un tiempo de aproximadamente 51 horas para cada circuito de prueba utilizando una interacción entre ATP y MATLAB. La simulación se realizó en un computador HP Compaq 6000 pro SFF, con procesador Intel™ core™2 Quad CPU Q8400 @ 2.66 GHz y memoria RAM instalada 4 GB, con sistema operativo de 32 bits.

e. *Indicadores de desempeño de los localizadores*

Para observar el comportamiento del MBM se emplea como indicador el error absoluto, el cual se calcula por medio de la ecuación (4.1).

$$ErrorAbsoluto[\%] = \left(\frac{DistanciaReal - DistanciaCalculada}{DistanciaTotal} \right) * 100 \quad (4.1)$$

Mediante el indicador de error absoluto, se realizan curvas de distancia real a la falla contra el error absoluto. Estas curvas permiten observar el desempeño del método de localización de fallas (MBM).

Existen dos conceptos que se utilizaron en el análisis, los cuales están directamente asociados con las gráficas de error absoluto, así:

Comportamiento de subestimación definido como el error positivo, debido a que la distancia calculada por el método es menor que la distancia real.

Comportamiento de sobrestimación definido como el error negativo, debido a que la distancia calculada por el método es mayor que la distancia real.

El desempeño de los MBC se calcula como el porcentaje de los registros que fueron bien clasificados, como se presenta en la ecuación (4.2).

$$\text{Precisión}[\%] = \left(\frac{\text{Número de datos bien clasificados}}{\text{Numero de datos de prueba}} \right) * 100 \quad (4.1)$$

Para el estudio con el MBM solo se analizaron los intervalos de variación de baja carga (Carga 1), media carga (Carga 2) y alta carga (Carga 3). Asimismo, en el análisis de la variación de la longitud del conductor, solo se analizaron los escenarios de variación de baja longitud (Línea 1), media longitud (Línea 2) y alta longitud (Línea 3). Los escenarios de variación total de la carga y de la línea (Carga 4 y Línea 4) fueron usados para el análisis con el MBC, ya que estos necesitan los escenarios de variación total para realizar su localización.

4.3.2. Análisis de sensibilidad del circuito de prueba IEEE de 34 nodos

4.3.2.1. Análisis con método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)

Este método de localización de fallas fue expuesto previamente en el capítulo dos de este trabajo, y fue desarrollado en el grupo de investigación ICE³ con el nombre de MBM E1.

En este análisis de sensibilidad se muestran los gráficos más representativos. En el anexo B.1, se presentan todas las gráficas obtenidas para los diferentes escenarios con el circuito de prueba IEEE de 34 nodos con el MBM E1. En este caso, la localización de la falla se efectúa sobre el radial trifásico del sistema de prueba (Radial 1), el cual tiene una longitud de 58 km aproximadamente.

4.3.2.1.1. Validación a condición nominal método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)

Como se menciono anteriormente, se parte de un análisis previo de lo que está ocurriendo con las condiciones nominales del circuito para determinar un punto de partida del análisis exhaustivo de los diferentes escenarios.

Los resultados obtenidos a condición nominal se muestran a continuación:

a) Falla monofásica (AT)

Se presenta un comportamiento de sobre-estimación de la falla hasta el kilometro 40 aproximadamente, luego pasa a tener un comportamiento de subestimación hasta el final del radial analizado; en este caso los errores presentados no son muy críticos. El rango de máximo error alcanzado por el método para este caso oscila entre -1.6% a 1.3%. La figura 4.3 muestra la gráfica de desempeño obtenida por el MBM E1 en esta condición.

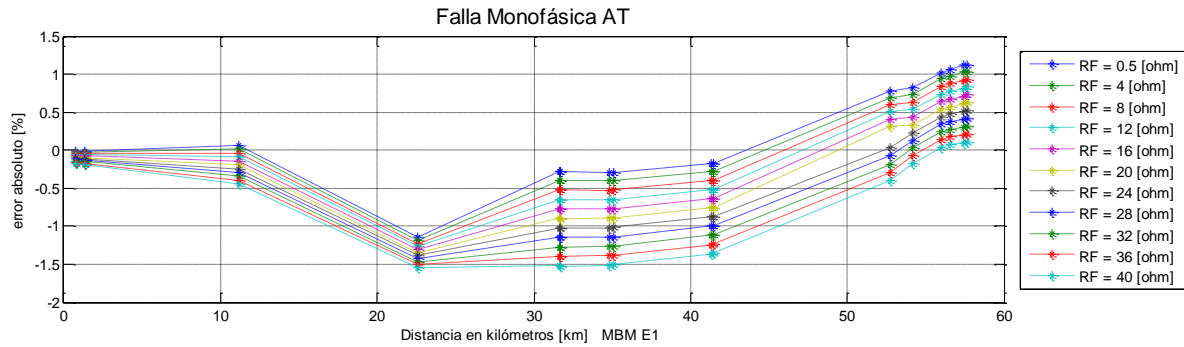


Figura 4. 3. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla monofásica.

b) Falla bifásica (AB)

En la mayor parte del radial analizado se presenta un comportamiento de subestimación de la falla para las diferentes resistencias de falla analizadas. El rango máximo de error de estimación de la falla está entre -1.3% a 3%, estos errores no son críticos. La figura 4.4, muestra la gráfica de desempeño para esta condición de falla.

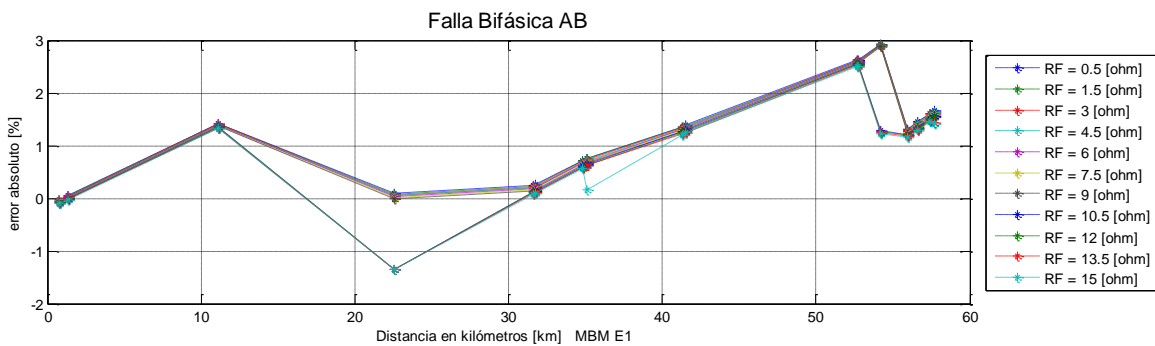


Figura 4. 4. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla bifásica.

c) Falla trifásica (ABC)

En general el método presenta un comportamiento de subestimación en la mayoría del radial analizado después del kilómetro 20. El máximo rango de error de estimación alcanzado por el método oscila entre -1.3% a 3.8%. La figura 4.5 muestra la gráfica de error para este escenario.

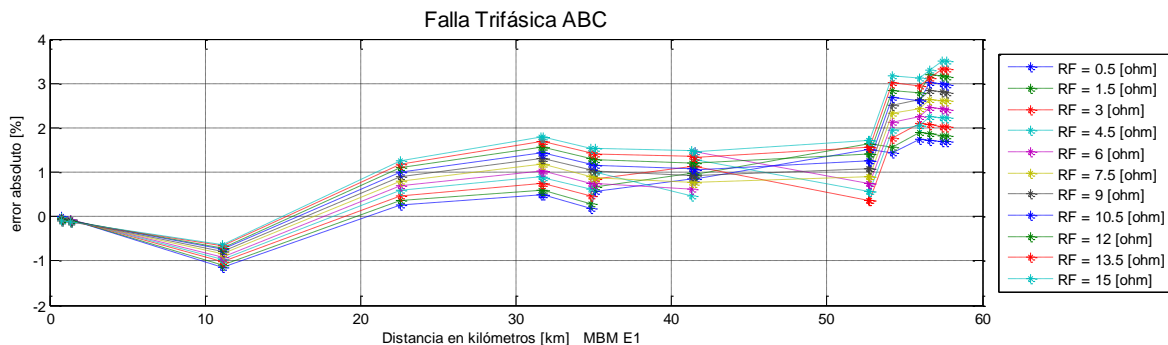


Figura 4. 5. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla trifásica.

En general el método de localización MBM E1, presenta un buen desempeño bajo condiciones nominales, con errores que no son críticos.

4.3.2.1.2. Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

✓ Variación aleatoria de la carga [10 - 30]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de baja carga (Carga 1).

a) Falla monofásica (AT)

Para esta condición de carga, hay una reducción en el error de estimación de la distancia de falla para el modelo de Z_{cte} , se presenta un rango de error entre -1.2% a 1%. Para el modelo de la carga I_{cte} , el rango de error tuvo una leve reducción, entre -1.5% a 1%, para las diferentes resistencias de falla analizadas; asimismo, para el modelo híbrido. Finalmente, el modelo de S_{cte} y el modelo IEEE original, también presentan una reducción en el error de estimación, con un rango entre -1.3% a 1%.

Este comportamiento de reducción del error era esperado como se expuso previamente en el capítulo tres con el índice de impedancia (α) propuesto, donde para variaciones de baja carga del sistema, el desempeño del localizador MBM mejora, ya que el sistema se encuentra poco cargado y el índice α es alto (alrededor de 60), indicando que la impedancia vista desde la subestación comparada con la máxima resistencia de falla esperada es mayor (ver ecuación 3.36). Adicionalmente, como se pudo observar en las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los modelos de la carga, el modelo de Z_{cte} es el modelo de la carga que presenta el menor error de estimación para este tipo de falla, esto se debe a que la mayoría de los localizadores de falla (MBM) encontrados en la literatura basan su planteamiento en este modelo de la carga, al igual que el MBM E1, como se expuso anteriormente en el capítulo dos y tres de este trabajo. En la figura 4.6 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 10% y el 30% de la carga nominal.

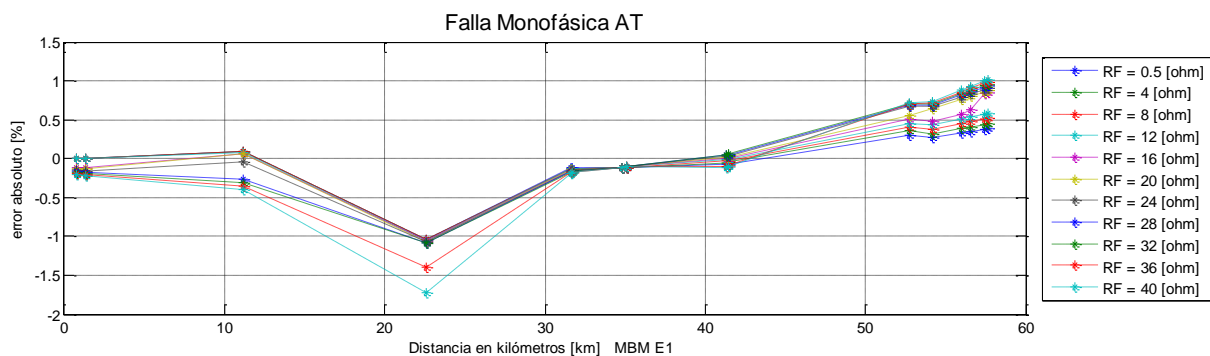


Figura 4. 6. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de I_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

En este caso, para los diferentes modelos de la carga, bajo esta condición de falla y este escenario de variación se presento una reducción en el error de estimación de la falla generalizado, mostrando un comportamiento similar al obtenido a condición nominal. El máximo rango de error presentado por el localizador está entre -1.5% a 2.2% para todos los modelos de la carga. Al igual que en la falla anterior, esto ocurre por que el sistema se encuentra poco cargado y presenta un índice de impedancia (α) alto, como se explico previamente.

La figura 4.7 muestra la curva de desempeño para uno de los escenarios bajo esta condición de carga.

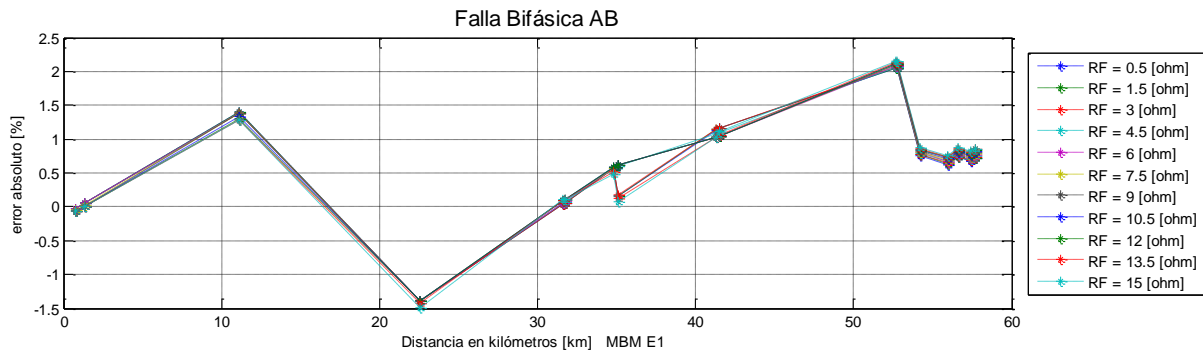


Figura 4. 7. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

Bajo esta condición, para los diferentes modelos de la carga, se presenta un comportamiento similar al obtenido a condición nominal, pero con una leve reducción en el error. El rango de error oscila entre -1.3% a 3%, para las diferentes resistencias de falla y los modelos de la carga analizados. La figura 4.8 muestra la curva de desempeño para uno de los escenarios estudiados bajo esta condición de carga.

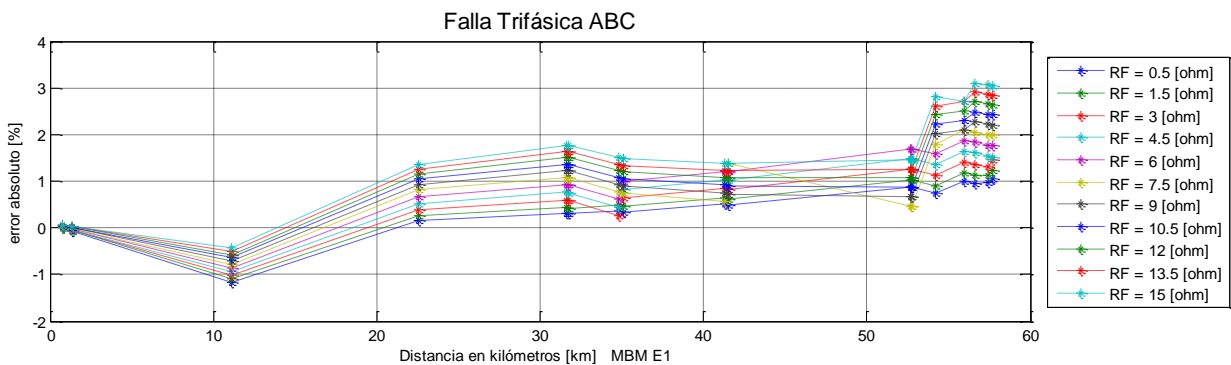


Figura 4. 8. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [10 - 30] %, para modelo de carga original del IEEE de 34 nodos.

✓ Variación aleatoria de la carga [60 - 100]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de media carga (Carga 2).

a) Falla monofásica (AT)

Para el modelo de Z_{cte} , se presenta un comportamiento similar a la condición nominal, pero con una leve disminución del error. Para el modelo de la carga I_{cte} , se presenta un comportamiento un poco distinto al de la condición nominal con errores mayores (entre -2% a 1.5%). El modelo S_{cte} , al igual que el modelo anterior presento un aumento en el error de estimación de la distancia de falla, entre -2.5% a 1%. El modelo híbrido presenta un comportamiento similar al de I_{cte} , pues como se expuso anteriormente es un modelo híbrido que posee un 80% de comportamiento de I_{cte} y un 20% de Z_{cte} . Finalmente, el modelo original IEEE de 34 nodos, presenta un comportamiento similar al modelo de S_{cte} , pero con errores levemente menores. El índice de impedancia α , calculado con la ecuación (3.36), a pesar que es menor que el anterior (alrededor de 15), sigue siendo relativamente bueno, por tanto el desempeño del localizador se mantiene, aunque con pequeños aumentos del error en algunos modelos.

La diferencia entre las curvas de desempeño de los diferentes modelos de la carga analizados para la misma falla se debe al comportamiento del modelo, ya que dependiendo del modelo de la carga, las señales de tensión y corriente son diferentes y por tanto los resultados obtenidos en las curvas de desempeño.

En la figura 4.9 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 60% y el 100% de la carga nominal, para este tipo de falla.

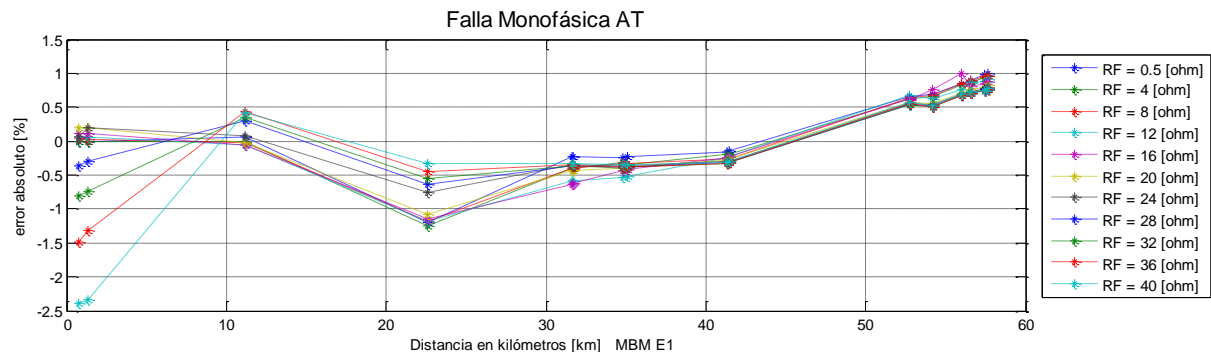


Figura 4. 9. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [60 - 100] %, para modelo de S_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

Para los diferentes modelos de carga propuestos se mantiene un comportamiento similar al presentado a condición nominal, con una leve disminución del error y un rango máximo entre -1.5% a 2.5% para todos los modelos, excepto para S_{cte} donde el error oscila entre -1.5% a 3%.

Las diferencia en las curvas de desempeño entre los tipos de falla es debido a la técnica de localización de fallas, ya que dependiendo del desarrollo del MBM para cada tipo de falla, los resultados de las curvas de desempeño son diferentes. En la figura 4.10 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 60% y el 100% de la carga nominal, para este tipo de falla.

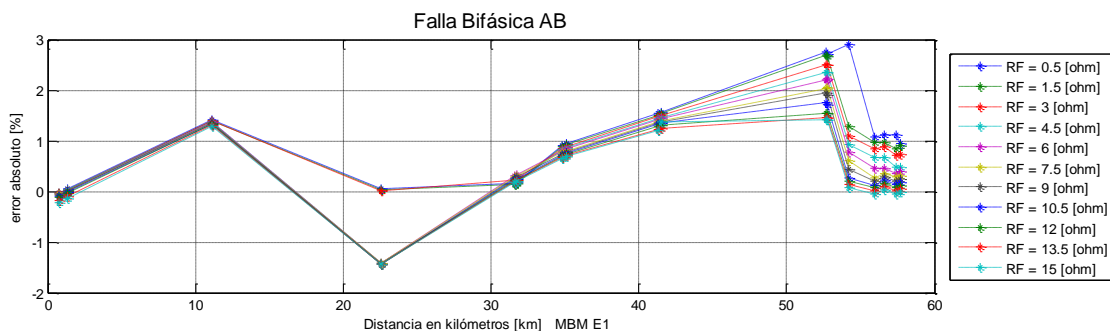


Figura 4. 10. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [60 - 100] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

Se presento un comportamiento en la curva de desempeño similar al obtenido a condición nominal, con la diferencia que en la mayoría de los modelos de la carga analizados se presentaba un error levemente mayor al final del radial equivalente (entre -1.2% a 4.2%). Adicionalmente, en la mayoría de los casos, el modelo que mayor diferencia presenta con respecto del caso nominal es el modelo de S_{cte} , esto se debe a que como se explico previamente, la mayoría de aplicaciones de localización de falla consideran un modelo de Z_{cte} , el cual generalmente es el que menor error presenta, mientras que el modelo S_{cte} , es el que mas se aleja del modelo base o nominal (Z_{cte}), debido a su comportamiento. En la figura 4.11 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

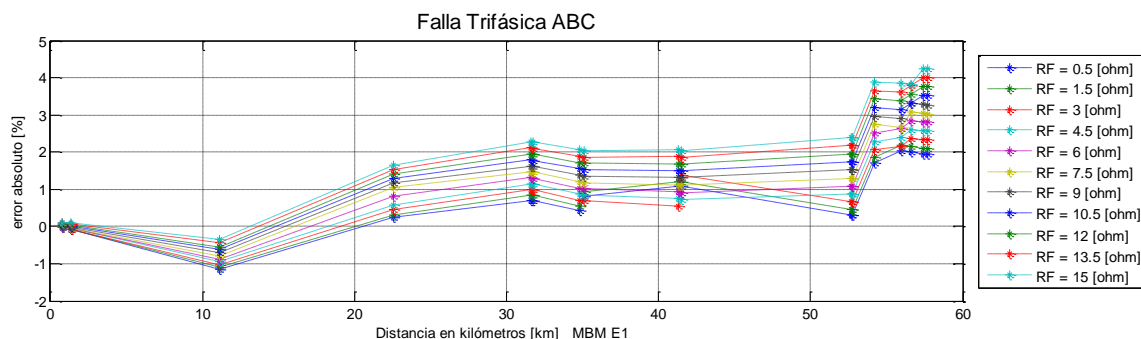


Figura 4. 11. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .

✓ Variación aleatoria de la carga [135 - 145]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de alta carga (Carga 3).

a) Falla monofásica (AT)

Para el modelo de Z_{cte} , se nota un aumento en el rango de error y un comportamiento similar al nominal en la curva de desempeño, el cual oscila entre -2.3% a 1.5%. El modelo de I_{cte} presenta un aumento entre -1.8% a 2.2%. Los modelos S_{cte} e híbridos también presentan aumento en el rango de error, siendo el modelo de S_{cte} el que mayor rango de error presenta para este tipo de falla con esta variación y para las diferentes resistencias de falla analizadas (entre -2% a 10%).

El comportamiento anterior era esperado, como se explico previamente, debido a que el índice de impedancia α para los escenarios con los modelos de carga y esta variación es bajo (entre 5 y 8.5), por tanto se espera que el desempeño del localizador empeore, como se comprueba por medio de las simulaciones. Adicionalmente, como se menciona, el modelo que mayor diferencia presenta es el de S_{cte} , este a su vez presenta el índice de impedancia α más bajo (5.37). Por otro lado, el modelo de Z_{cte} es el que menor error presenta, debido a que su índice α es el mas alto para esta variación (8.57). Un índice α alto indica un mejor desempeño y viceversa.

En la figura 4.12 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

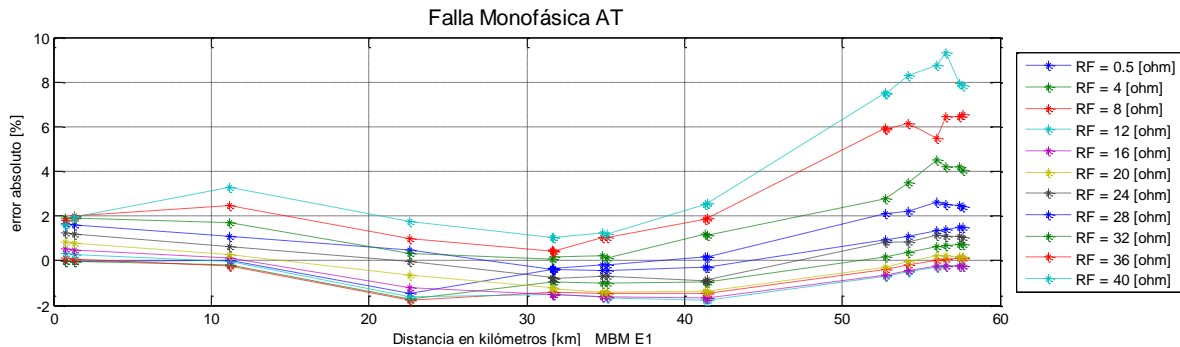


Figura 4. 12. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

Para los modelos de Z_{cte} , I_{cte} e híbrido, el rango de error aumento levemente oscilando entre -1.5% a 3.1%. Por otro lado, los modelos S_{cte} y el original IEEE de 34 nodos presentaron errores un poco mayores con un rango entre -1.8% a 4.3%. Este comportamiento se debe a lo expuesto anteriormente, ya que el sistema se encuentra con carga alta, el índice de

impedancia α es alto, por tanto la impedancia vista desde la subestación comparada con la máxima resistencia de falla esperada es mas baja y el desempeño del localizador empeora. Finalmente, en la figura 4.13 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

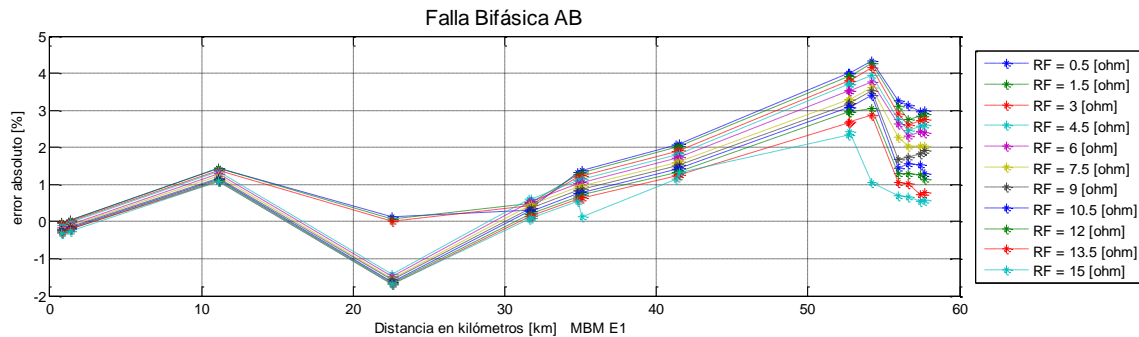


Figura 4. 13. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

El comportamiento de las curvas de desempeño para los diferentes modelos es similar, pero con aumentos en el rango de error, como se había previsto por medio del índice de impedancia α propuesto. El modelo que mayor error presenta es el modelo de S_{cte} y el de menor error el de Z_{cte} , como se esperaba y se expuso previamente. En la figura 4.14 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

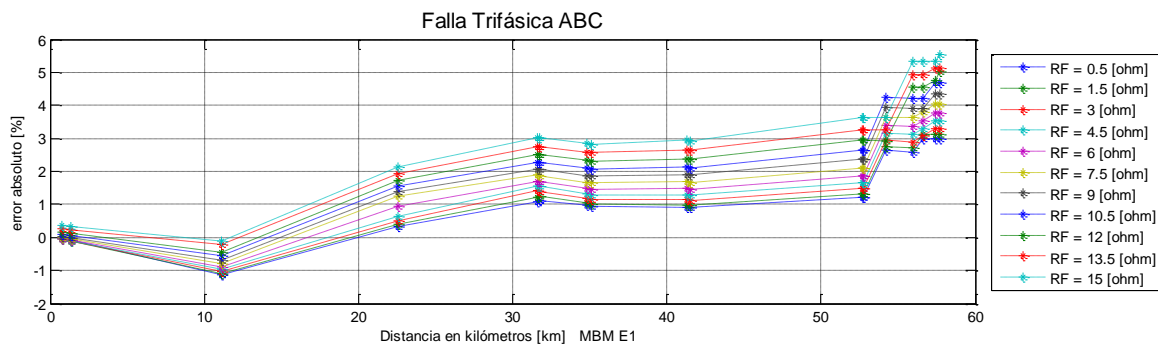


Figura 4. 14. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [135 - 145] %, para modelo de S_{cte} .

4.3.2.1.3. Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente

✓ Variación aleatoria de la tensión de la fuente [0.95 – 1.05]p.u

Como se menciona, para esta variación se tomaron los modelos de Z_{cte} y S_{cte} , ya que son los que presentan los errores menores y mayores respectivamente. A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados, para cada tipo de falla y para este escenario de variación (Tensión).

a) Falla monofásica (AT)

Los modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) presentaron un comportamiento similar al obtenido a condición nominal. El rango de error máximo fue similar al de condición nominal (entre -1.5% a 1.3%), a pesar de la variación en la magnitud de la tensión en la fuente. El modelo de S_{cte} presentó errores un poco mayores y mas separados entre para las diferentes resistencias de falla analizadas, pero se mantuvo en el rango de error nominal.

b) Falla bifásica (AB)

El modelo de Z_{cte} presentó un comportamiento similar al nominal, con el mismo rango de error. Por otro lado, el modelo de S_{cte} presentó un leve aumento del error al final del radial equivalente analizado. La variación en la magnitud de la tensión no afecta el desempeño del localizador para este tipo de falla.

c) Falla trifásica (ABC)

El modelo de Z_{cte} presentó una leve disminución en el rango de error. El modelo de S_{cte} presenta un comportamiento similar al nominal con el mismo rango de error.

De acuerdo a los tres tipos de fallas analizadas, se dice que para la variación en la tensión de la fuente, el localizador MBM E1 no se ve afectado notoriamente. En la figura 4.15 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de tensión en la fuente entre el 95% y el 105% de la tensión nominal en la subestación.

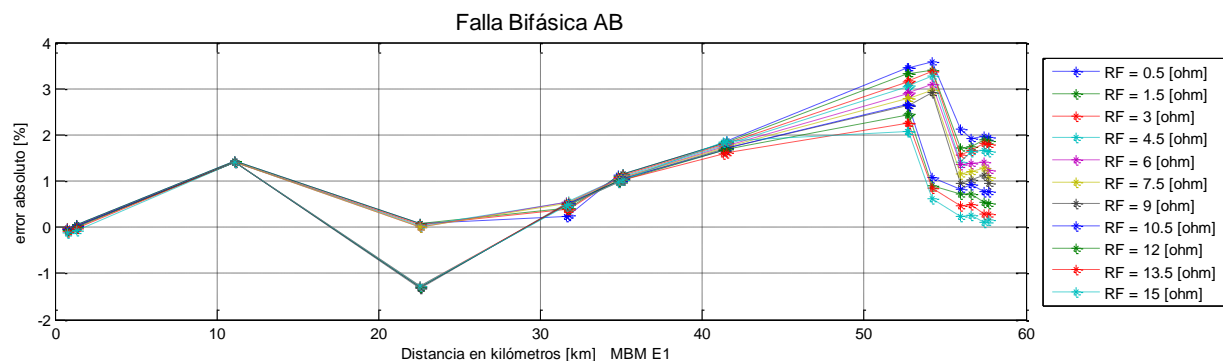


Figura 4. 15. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de tensión en la fuente [0.95 – 1.05] p.u, para modelo de S_{cte} .

4.3.2.1.4. Variaciones de la longitud del conductor de la línea

✓ Variación aleatoria de longitud del conductor [95 – 98]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de longitud baja de la línea (Línea 1).

a) Falla monofásica (AT)

En general se presenta un comportamiento de subestimación para el radial analizado con el modelo de Z_{cte} , mientras que para el modelo de S_{cte} se presenta después del kilometro 5 aproximadamente. El error en la estimación aumento, especialmente al final del radial. Lo anterior se debe a que la disminución de a longitud de la línea afecta directamente al localizador, pues este tendrá una menor impedancia al realizar el cálculo de la distancia de falla y por consiguiente se dará una mayor subestimación en la distancia de la falla, aumentando el error. El mayor rango de error alcanzado lo presento el modelo de S_{cte} (entre -1.8% a 5%).

b) Falla bifásica (AB)

En este caso el error aumento, presentando un comportamiento de subestimación a lo largo del radial para los diferentes modelos de carga y para las diferentes resistencias de falla analizadas. El rango de error mayor fue presentado por el modelo de S_{cte} (entre 0% y 8%). Como se explico anteriormente, esto se debe a la disminución en la variación de la longitud de la línea.

c) Falla trifásica (ABC)

Se presenta un comportamiento de subestimación para los diferentes modelos de la carga, con un rango de oscilación del error entre 0% a 8%. Lo anterior se explica por la disminución en la longitud del conductor dada por la variación realizada.

En la figura 4.16 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 95% y el 98% de la longitud nominal de la línea.

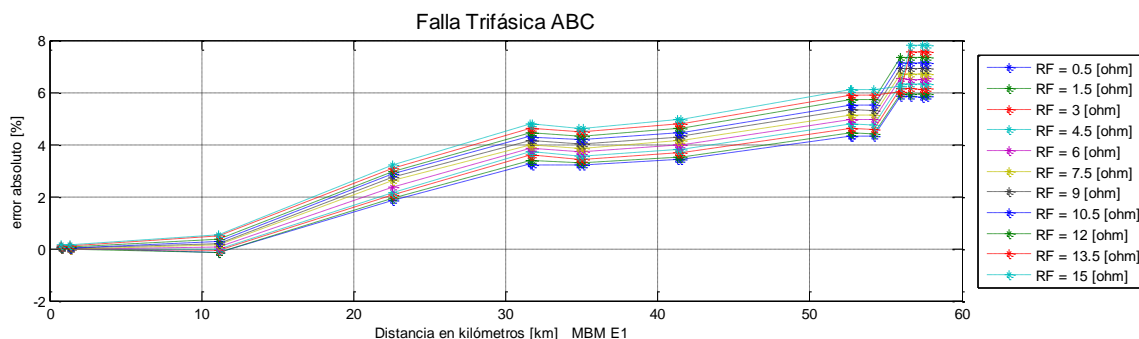


Figura 4. 16. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [95 – 98] %, para modelo de S_{cte} .

✓ Variación aleatoria de la longitud del conductor [98 – 102]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de longitud media de la línea (Línea 2).

a) Falla monofásica (AT)

Para los diferentes modelos de la carga analizados se presenta un comportamiento similar a la condición nominal, con el mismo rango de error (entre -1.5% a 1.3), aunque el modelo de S_{cte} presenta una mayor separación en las curvas para cada resistencia de falla analizada. Este comportamiento se esperaba, pues el rango de variación de la longitud es aproximadamente alrededor del 100% de la longitud nominal, lo que hace que las curvas de desempeño sean similares.

b) Falla bifásica (AB)

Los modelos de la carga presentan un comportamiento similar al obtenido a condición nominal, aunque el modelo de S_{cte} presenta un error levemente mayor (entre -1.5% a 4%) al final del radial analizado. Esta variación de la longitud no influye notoriamente al localizador, ya que se realiza cerca de la condición nominal o base, como se expuso anteriormente.

c) Falla trifásica (ABC)

Para el modelo de Z_{cte} la curva de desempeño se mantiene, mientras que para el modelo de S_{cte} aumenta levemente, pero sigue el mismo comportamiento que a condición nominal. Esto se debe a lo expuesto en el caso anterior.

En la figura 4.17 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 98% y el 102% de la longitud nominal de la línea.

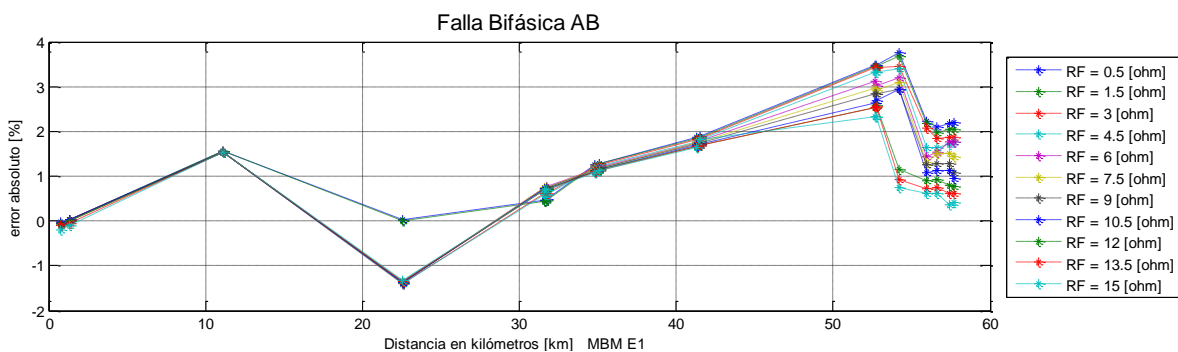


Figura 4. 17. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [98 – 102] %, para modelo de S_{cte} .

✓ **Variación aleatoria de la longitud del conductor [102 – 105]%**

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación alta de longitud de la línea (Línea 3).

a) Falla monofásica (AT)

En general los modelos de la carga presentan curvas de desempeño con sobre-estimación de la distancia de falla. El mayor rango de variación del error esta entre -3.5% a 0.5%. Este comportamiento de sobre-estimación se debe a que la variación realizada es de aumento de la longitud del conductor, lo cual hace que la impedancia vista por el localizador debido a las líneas sea mayor y éste tienda a sobre-estimar la falla. Si el localizador presenta sobre-estimación, esta se ve intensificada, si por el contrario presentaba subestimación, con el aumento de la longitud esta se ve disminuida.

b) Falla bifásica (AB)

En este caso en la mayoría del radial se presenta sobre-estimación de acuerdo a la curva de desempeño obtenida para cada modelo de la carga. El rango de error oscila entre -2.5% y 1.5%. Este comportamiento se debe a lo expuesto anteriormente, debido al aumento de la longitud del conductor.

c) Falla trifásica (ABC)

En este caso, el rango de error se vio disminuido (entre -2% y 1.5%) y el localizador tiende a mostrar sobre-estimación de la distancia de falla. Esto se debe a que a condición nominal el desempeño del localizador era mas de subestimación, entonces al realizar el aumento de la longitud el comportamiento de subestimación se vio disminuido y el localizador tiende a sobre-estimar la falla, disminuyendo el error, como se explico anteriormente.

En la figura 4.18 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 102% y el 105% de la longitud nominal de la línea.

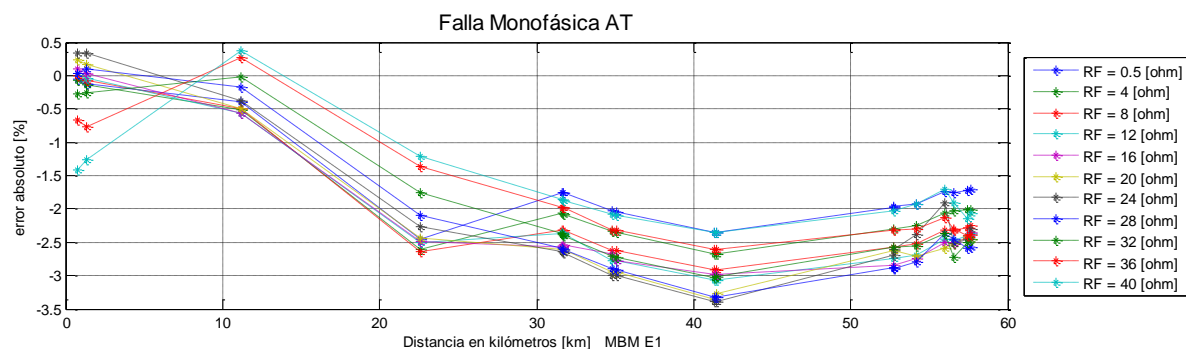


Figura 4. 18. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [102 – 105] %, para modelo de S_{cte} .

4.3.2.1.5. Tablas de resumen de los principales resultados para el sistema de prueba IEEE de 34 nodos

En las tablas 4.5 a 4.8 se muestra el resumen del análisis de sensibilidad.

Tipo de falla	Error absoluto máximo para la Condición Promedio - Nominal [%] MBM_E1
1ϕ	-1.6 a 1.3
2ϕ	-1.3 a 3.0
3ϕ	-1.3 a 3.8

Tabla 4. 5. Rango de error a condición nominal.

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1				
		Zcte	Icte	Scte	Hibrido	Original IEEE 34
Carga baja [10-30]	1ϕ	-1.2 a 1.0	-1.5 a 1.0	-1.2 a 1.0	-1.5 a 1.0	-1.3 a 1.0
	2ϕ	-1.5 a 2.2	-1.5 a 2.2	-1.5 a 2.2	-1.5 a 2.2	-1.5 a 2.1
	3ϕ	-1.2 a 3.0	-1.3 a 3.0	-1.2 a 3.0	-1.2 a 3.0	-1.2 a 3.0
Carga media [60-100]	1ϕ	-1.4 a 1.0	-2.0 a 1.5	-2.5 a 1.0	-1.5 a 1.4	-1.3 a 1.0
	2ϕ	-1.5 a 2.4	-1.5 a 2.2	-1.5 a 3.0	-1.5 a 2.3	-1.5 a 2.8
	3ϕ	-1.2 a 3.8	-1.2 a 4.0	-1.2 a 4.2	-1.1 a 4.0	-1.1 a 4.0
Carga alta [135-145]	1ϕ	-2.3 a 1.5	-1.8 a 2.2	-2.0 a 10	-1.5 a 1.7	-1.7 a 1.5
	2ϕ	-1.5 a 3.1	-1.3 a 3.0	-1.8 a 4.3	-1.3 a 3.0	-1.3 a 4.0
	3ϕ	-1.1 a 4.0	-1.1 a 4.5	-1.0 a 5.5	-1.1 a 4.3	-1.0 a 4.5

Tabla 4. 6. Rango de error para variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1	
		Zcte	Scte
Tensión aleatoria de la Fuente [0.95 – 1.05]	1ϕ	-1.5 a 1.2	-1.5 a 1.3
	2ϕ	-1.3 a 3.0	-1.3 a 3.6
	3ϕ	-1.3 a 3.8	-1.1 a 3.3

Tabla 4. 7. Rango de error para variación aleatoria de la fuente.

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1	
		Zcte	Scte
Longitud baja de la Línea [95 – 98]	1ϕ	0.0 a 5.0	-1.8 a 5.0
	2ϕ	0.0 a 7.0	0.0 a 8.0
	3ϕ	0.0 a 7.0	0.0 a 8.0
Longitud media de la Línea [98 – 102]	1ϕ	-1.5 a 1.3	-1.5 a 1.4
	2ϕ	-1.5 a 3.0	-1.5 a 4.0
	3ϕ	-1.0 a 3.3	-1.0 a 4.3
Longitud alta de la Línea [102 - 105]	1ϕ	-3.6 a 0.0	-3.5 a 0.5
	2ϕ	-2.5 a 1.5	-2.5 a 1.1
	3ϕ	-1.6 a 1.6	-2.0 a 1.5

Tabla 4. 8. Rango de error para variación aleatoria de la longitud de los conductores.

4.3.2.1.6. Conclusiones MBM E1

✓ A condición nominal:

El localizador presenta un buen desempeño y no se dan errores considerables para los diferentes tipos de falla analizados. Se puede decir que la falla trifásica presenta el rango de error más alto a condición nominal.

✓ Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

El MBM E1, presenta un buen desempeño para las diferentes variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga, mostrando errores aceptables.

Cuando el sistema se encuentra poco cargado, el desempeño del localizador mejoro, como se pudo comprobar por medio de las simulaciones. Al igual que el índice de impedancia (α) propuesto ayuda a predecir el comportamiento del desempeño del localizador. Así, cuando el sistema de alimentación está con poca carga, el valor de α es mayor que el obtenido en condiciones nominales, lo que indica que la impedancia vista desde la subestación es mayor que la resistencia de falla base. Entonces, tal como se obtiene en las curvas de rendimiento para el MBM, se observa una reducción en el error de estimación en la mayoría de los casos. Adicionalmente, para una carga media del sistema, el desempeño del localizador se mantiene, presentando errores aceptables.

Por otra parte, cuando el sistema de alimentación presento una carga alta, el valor del índice α disminuyo, presentando un peor rendimiento, debido a que la impedancia vista desde la subestación se parece mas a la resistencia de falla base, lo cual dificulta la tarea de localización de fallas.

Para la mayoría de los casos el modelo de la carga que mayor error presenta en la localización de la falla es el modelo de S_{cte} , esto se debe a que es el modelo que más se aleja del caso de condición nominal (Z_{cte}). Finalmente, el modelo que menor error presenta en los diferentes escenarios estudiados es el modelo de Z_{cte} , como se expuso previamente, esto se debe a que la técnica de localización de falla esta desarrollada considerando este modelo de la carga. Por tanto es importante considerar el modelo de la carga al realizar las tareas de localización de fallas, para obtener una mejor estimación de la falla.

✓ Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente

Como conclusión general, el desempeño de la metodología MBM E1 no se ve afectado por variaciones de tensión en la fuente.

✓ Variaciones de la longitud del conductor de la línea

Como conclusión general, el desempeño de la metodología MBM E1 se ve afectada por las variaciones en la longitud del conductor de la línea cuando éstas son notorias.

Si la variación involucra un decremento en la longitud del conductor, el desempeño de la metodología tiende a subestimar más la falla, por esta razón cuando se tiene un error de subestimación este aumenta. Si por el contrario se tiene un comportamiento en el error nominal de sobrestimación, ante una variación de decremento de longitud el localizador tiende a disminuir este error.

Si la variación involucra un incremento de la longitud del conductor de la condición nominal, el desempeño de la metodología se afecta y tiende a sobrestimar la distancia de falla. Por esta razón, cuando se tiene sobrestimación en el comportamiento de la gráfica inicialmente y se incrementó la longitud del conductor, este error de sobrestimación tiende a aumentar y el error en la subestimación tiende a disminuir.

4.3.2.2. Análisis con método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)

Como se menciono anteriormente, la base de datos del circuito de prueba se construye mediante simulación del circuito. En total en el circuito IEEE de 34 nodos se simularon 32736 fallas que quedan disponibles para parametrizar, entrenar y validar el MBC. En este análisis se muestran los resultados más relevantes.

4.3.2.2.1. Zonificación

Una zona es un conjunto de nodos del circuito agrupados por criterios como distancia, topología del circuito, tipo de circuito o tipo de conductor [GIL11], [GUTI11]. El circuito IEEE de 34 nodos se divide en 8 zonas, como se muestra en la figura 4.19. Este criterio de zonificación se realizó siguiendo lo expuesto en [GUTI11], para el mismo circuito.

Los nodos que corresponden a cada zona y el número de fases por cada nodo se muestran en la tabla 4.9.

Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo
1	800	3φ	4	824	3φ	6	858	3φ	8	860	3φ
	802	3φ		826	1φB		832	3φ		840	3φ
	806	3φ		828	3φ		852	3φ		862	3φ
2	808	3φ		830	3φ		864	1φA		836	3φ
	810	1φB		854	3φ	7	842	3φ		838	1φB
3	812	3φ		856	1φB		844	3φ			
	814	3φ	5	818	1φA		846	3φ			
	850	3φ		820	1φA		848	3φ			
	816	3φ		822	1φA		834	3φ			

Tabla 4. 9. Zonificación del circuito IEEE de 34 nodos

La configuración de la SVM (MBC) comprende una fase de parametrización y una de entrenamiento. Esta parametrización se realiza con el fin de obtener los parámetros C y σ , expuestos en el capítulo dos que son usados por la SVM (MBC) para realizar el

entrenamiento de los datos. La parametrización y el entrenamiento se realizaron teniendo en cuenta los criterios expuestos en [GIL11], [GUTI11]. En este caso, se parametrizo con el circuito a condición nominal para cada modelo de la carga para las variaciones en la magnitud de la carga y de la tensión de la fuente. En caso de la variación de la longitud se parametrizo con el escenario de la variación de longitud alrededor de la nominal [98 - 102]%. Los tiempos de simulación al realizar la parametrización para los escenarios de variación de carga y de fuente fueron menores a 10 minutos. Para el escenario de variación de la longitud la parametrización tardo aproximadamente 4 horas.

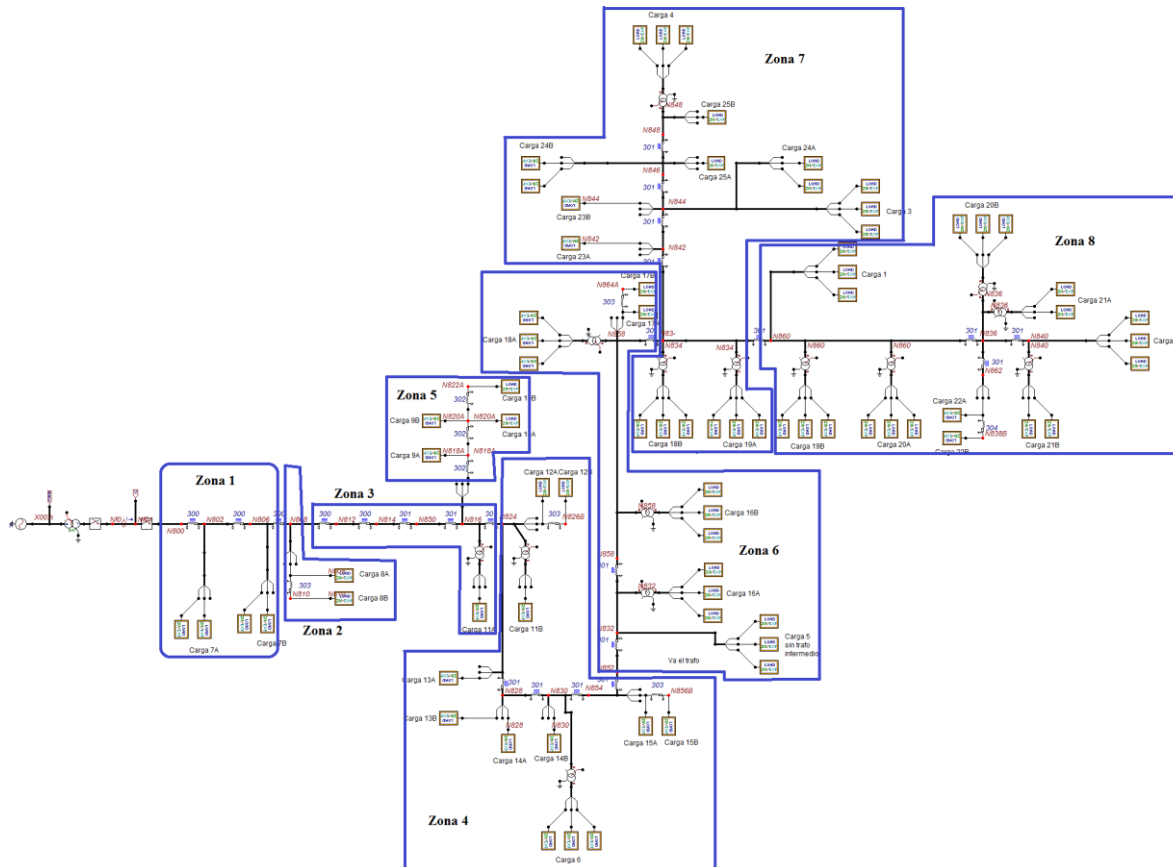


Figura 4. 19. Zonificación del circuito IEEE de 34 nodos

4.3.2.2.2. Resultados y análisis

Los descriptores de entrada al MBC son las variaciones en la tensión, la corriente, la variación del ángulo de la tensión y la variación del ángulo de la corriente (dV , dI , $d\theta_V$ y $d\theta_I$). Para cada uno de los descriptores mencionados se tienen las medidas de fase y de línea. En total se evalúan 3 combinaciones de descriptores por falla.

Inicialmente, con los resultados obtenidos de la parametrización, se entreno con el escenario de variación total para carga, línea y fuente; y luego se valido con los otros escenarios de variación adicionales al realizado, pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. Finalmente, siguiendo el lineamiento expuesto por [GIL11], [GUTI11], se

realizo el entrenamiento con todas las condiciones de operación disponibles para cada variación (carga, fuente y línea) y se realizó la validación con la misma base de datos. Es importante anotar, que los nodos tomados en el entrenamiento son diferentes de los nodos tomados para la validación.

Las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 muestran los resultados obtenidos con la SVM (MBC). Los errores más bajos para cada tipo de falla y modelo de la carga se muestran subrayados.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO						
Todos los escenarios de carga						
CONDICION DE VALIDACIÓN						
Todos los escenarios de carga						
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabu-SVM (MBC)				Original IEEE 34
		Zcte	Icte	Scte	Hibrido	
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	<u>94.95</u>	94.75	<u>78.79</u>	98.99	84.65
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	98.79	95.35	<u>91.72</u>	<u>95.76</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	<u>94.34</u>	95.56	99.60	98.99
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	98.70	100.00	<u>86.23</u>	<u>98.18</u>	<u>96.62</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>95.32</u>	<u>99.48</u>	94.29	99.74	99.74
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	99.48	97.92	99.74	100.00
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	88.57	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>	88.57	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>	88.31	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>

Tabla 4. 10. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la carga.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO			
Escenario de Tensión			
CONDICION DE VALIDACIÓN			
Escenario de Tensión			
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabu-SVM (MBC)	
		Zcte	Scte
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	100.00
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	100.00
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	100.00
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	100.00
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	100.00
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	100.00
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	<u>85.71</u>	92.89
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>86.96</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>86.96</u>

Tabla 4. 11. Entrenamiento y validación con escenario para variación de la tensión.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO			
Todos los escenarios de Línea			
CONDICION DE VALIDACIÓN			
Todos los escenarios de Línea			
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabu-SVM (MBC)	
		Zcte	Scte
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	89.39
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	<u>90.66</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	91.41
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	<u>95.78</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	97.40
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	98.05
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	<u>85.71</u>	<u>85.71</u>

Tabla 4. 12. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la línea.

De acuerdo a las tablas 4.10, 4.11 y 4.12, para la variación de la carga se tiene que para la falla monofásica, el modelo de S_{cte} presentó la menor precisión para el primer juego de descriptores, para el segundo juego de descriptores el modelo híbrido y para la última combinación el modelo de I_{cte} . El modelo con mejor precisión fue el modelo de Z_{cte} , en este caso se puede evidenciar que el modelo de la carga afecta a la precisión del localizador, además si no se entrenaba con todas las condiciones de operación disponibles para la variación, el desempeño era bajo. En este caso de variación de la carga, la precisión oscilo entre (78.79% a 100%) para los diferentes modelos de la carga analizados. Para falla bifásica el modelo con menor precisión continua siendo S_{cte} . Para la falla trifásica en general, se presento una precisión relativamente baja (entre 85.71% a 88.57%).

Para la variación de la tensión en la fuente (Tabla 4.11), en general se tiene un muy buen desempeño del localizador (MBC) para falla monofásica y bifásica. En falla trifásica el desempeño del localizador no es tan bueno, aunque es más alto para el modelo de S_{cte} .

Finalmente, para la variación de la longitud de los conductores mostrado en la tabla 4.12, se encuentra que el modelo de Z_{cte} , presenta un buen desempeño para fallas monofásicas y bifásicas. El modelo de S_{cte} presenta menor precisión para el mismo tipo de falla. Ahora bien, para la falla trifásica se presentaron precisiones bajas para ambos modelos de la carga. En este caso al igual que para la variación de la carga, si el MBM no era entrenado con todas las condiciones de operación, se presentaba una baja precisión.

4.3.2.2.3. Conclusiones MBC

Como se puede observar en las tablas 4.10, 4.11 y 4.12, cuando se validan condiciones similares a las de entrenamiento el clasificador tabú-SVM presenta, en general, un buen rendimiento. La falla trifásica es la que presenta una menor precisión comparada con el resto de las fallas. Entonces, si se posee una buena base de datos de entrenamiento para el localizador (MBC), este presentara resultados satisfactorios para las diferentes variaciones realizadas. Adicionalmente, el modelo de la carga hace que se produzcan variaciones en la precisión del localizador.

Finalmente, se dice que el modelo es sensible a las variaciones de carga y longitud del conductor, si no se entrena con las suficientes condiciones de operación.

4.3.3. Análisis de sensibilidad del circuito de prueba basado en datos reales (Circuito de prueba P2)

4.3.3.1. Análisis con método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)

En este análisis de sensibilidad se muestran los gráficos más representativos. En el anexo B.2, se presentan todas las gráficas obtenidas para los diferentes escenarios, para el circuito de prueba P2 con el MBM E1. En este caso, la localización de la falla se efectúa sobre el radial más largo del sistema de prueba (Radial 1), el cual tiene una longitud de 13 km aproximadamente.

4.3.3.1.1. Validación a condición nominal método de localización de fallas propuesto por Damir Novosel (MBM E1)

Los resultados obtenidos a condición nominal se muestran a continuación:

a) Falla monofásica (AT)

Se presenta un comportamiento de subestimación a lo largo del radial analizado. Hasta el kilometro 7 se observan errores menores al $\pm 0.5\%$, después los errores empiezan a aumentar para las diferentes resistencias de falla analizadas. Lo anterior se debe a que después de los 7 km, el circuito se ramifica y tiene cargas laterales conectadas al radial, lo cual produce la incertidumbre en la localización. Además, la técnica de localización (MBM E1) se basa en simplificar el sistema de distribución concentrando las cargas al final del circuito, como se expuso previamente en el capítulo dos, lo cual hace que se incrementen los errores y estos sean mayores cuando el sistema se encuentra mas cargado, como en este caso. El rango máximo de error oscila entre -0.5% a 7% . El índice de impedancia α calculado para el circuito a condiciones nominales es 4.62, el cual es relativamente bajo, indicando que el sistema se encuentra cargado y de allí que presente un rango de error mayor que para el circuito anterior. La figura 4.20 muestra la gráfica de desempeño obtenida por el MBM E1 en esta condición.

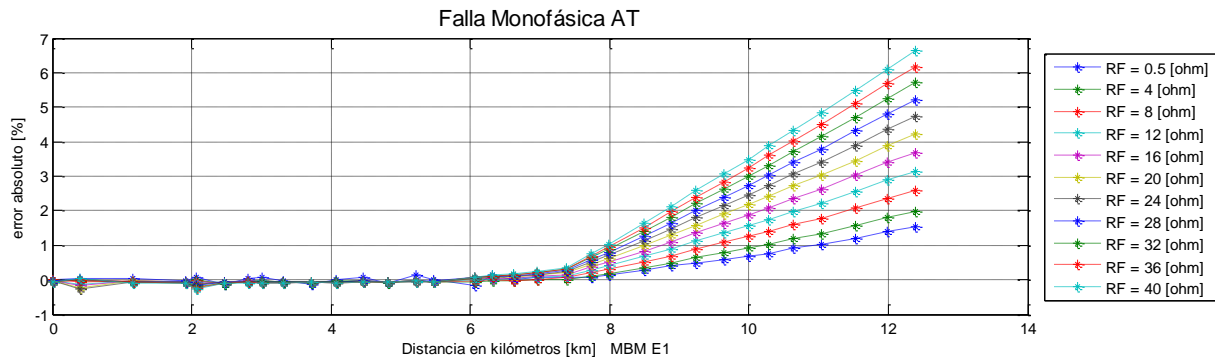


Figura 4. 20. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla monofásica.

b) Falla bifásica (AB)

Se observa un comportamiento de subestimación a lo largo del radial analizado. Al igual que en el caso anterior, los errores aumentan después del kilómetro 7, pero son menores, esto se debe a lo expuesto anteriormente. Finalmente, el máximo rango de error obtenido oscila entre 0% y 3.5%. La figura 4.21, muestra la gráfica de desempeño para esta condición de falla.

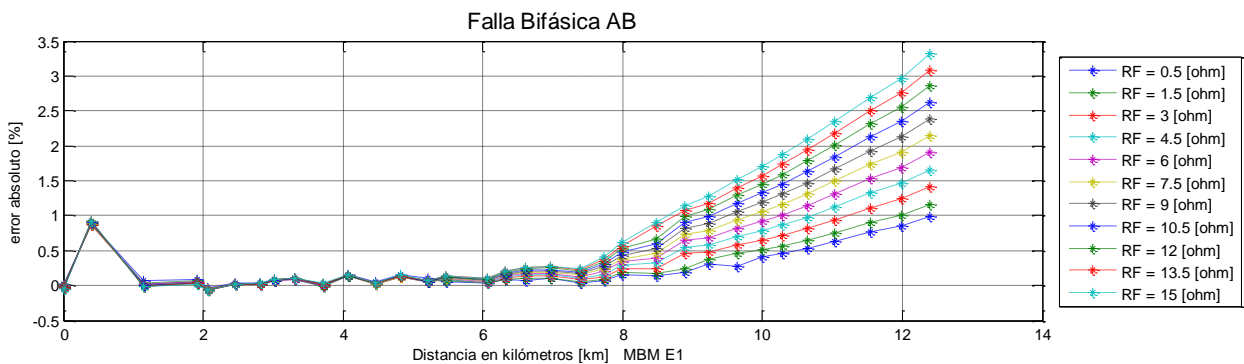


Figura 4. 21. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla bifásica.

c) Falla trifásica (ABC)

La figura 4.22 muestra la gráfica de error para este escenario.

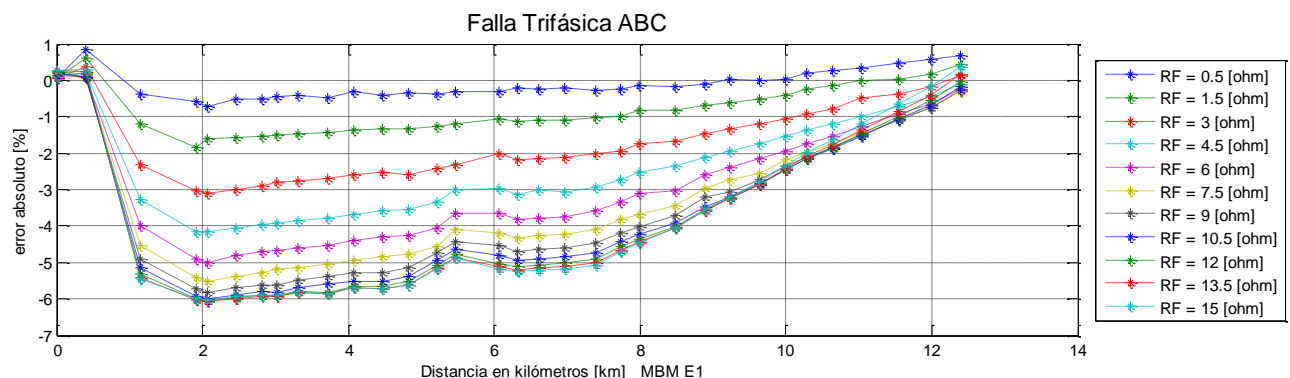


Figura 4. 22. Gráfica de error de estimación para condición nominal de falla trifásica.

Para esta condición, el método presenta un comportamiento de sobre-estimación de la distancia de falla, con un rango máximo de oscilación para las diferentes resistencias de falla analizadas entre -6% y 1%, con espacios entre las curvas de desempeño para cada resistencia de falla. En este caso como el valor del índice de impedancias α , es relativamente bajo, entonces el desempeño del localizador no es el mejor, además de las consideraciones que tiene el localizador expuestas anteriormente.

En general el método de localización MBM E1, presenta un buen desempeño bajo condiciones nominales, con errores que no son críticos.

4.3.3.1.2. Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

✓ Variación aleatoria de la carga [30 - 60]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de baja carga (Carga 1).

a) Falla monofásica (AT)

En este caso, se presenta una reducción en el error de estimación, para los modelos de la carga de Z_{cte} , I_{cte} e híbrido, con un rango máximo de error entre -1.2% a 3.8%. Para el modelo de S_{cte} , se presentó un leve aumento en el error con un rango máximo entre -1.8% a 6.2%. Este comportamiento de reducción del error era esperado como se expuso previamente en el capítulo tres con el índice de impedancia (α) propuesto, donde para variaciones de baja carga del sistema, el desempeño del localizador MBM mejora, ya que el sistema se encuentra poco cargado y el índice α es mas alto que a condición nominal (alrededor de 10), indicando que la impedancia vista desde la subestación comparada con la máxima resistencia de falla esperada es mayor (ver ecuación 3.36). Adicionalmente, el modelo de Z_{cte} , es el que presenta menor error, ya que la mayoría de localizadores trabajan con este modelo de la carga como se expuso previamente.

En la figura 4.23 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 30% y el 60% de la carga nominal.

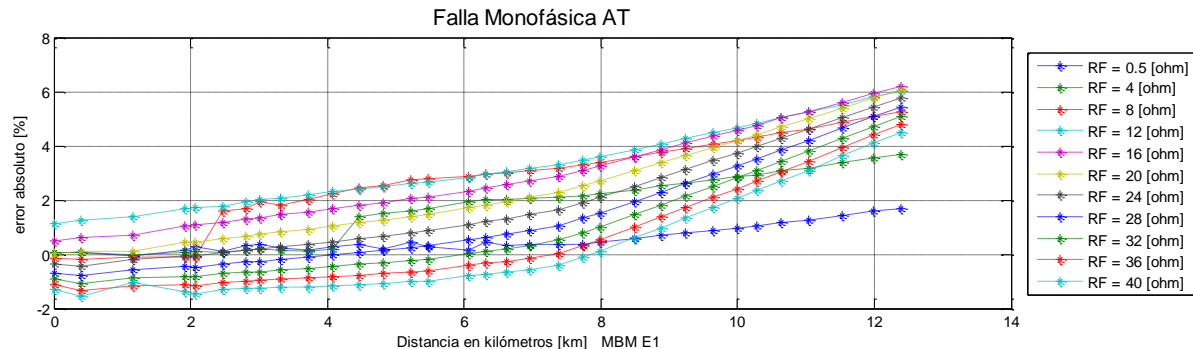


Figura 4. 23. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [30 - 60] %, para modelo de S_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

Para esta condición, el rango de error disminuyó para todos los modelos de la carga comparado con el caso nominal. El rango máximo de error para los modelos oscila entre 0% a 3%. El modelo con menor error es el Z_{cte} (-0.8% a 1%). También, al igual que en la falla anterior, esto ocurre por que el sistema se encuentra poco cargado y presenta un índice de impedancia (α) mas alto que el nominal, como se explico previamente. La figura 4.24 muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 30% y el 60% de la carga nominal.

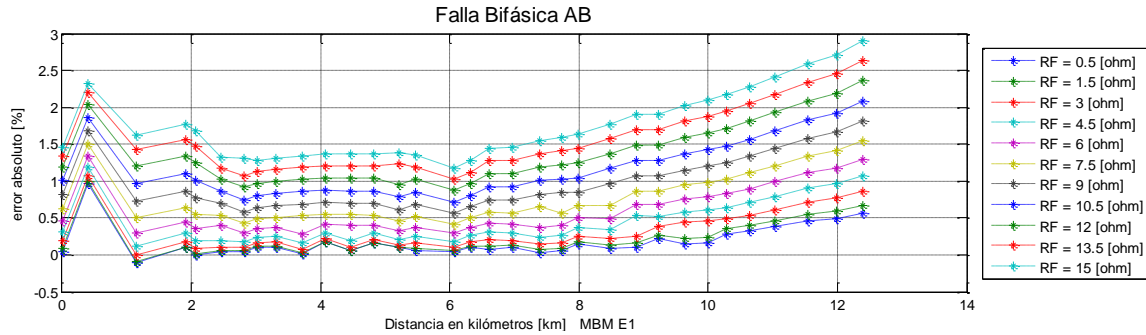


Figura 4. 24. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [30 - 60] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

Para este caso, en el modelo de Z_{cte} el error se mantuvo en el rango y la curva presento un comportamiento similar al obtenido a condiciones nominales. Para el modelo de I_{cte} y el híbrido, se presenta un comportamiento similar en la curva de desempeño con respecto de la nominal, pero con un pequeño aumento en el error de sobre-estimación para resistencias de falla altas, con un rango entre -8% a 1%. Adicionalmente, el modelo de S_{cte} presento un mayor aumento en el error, con un rango entre -12% a 1%. Este aumento del error en los casos de modelo de la carga diferente al nominal para baja carga, se debe a que el modelo de la carga influye en las señales de tensión y corriente del circuito, haciendo que el localizador presente diferencias entre las curvas de desempeño, como se expuso anteriormente. La figura 4.25 muestra la curva de desempeño para el peor de los casos en las pruebas con los escenarios bajo esta condición de carga.

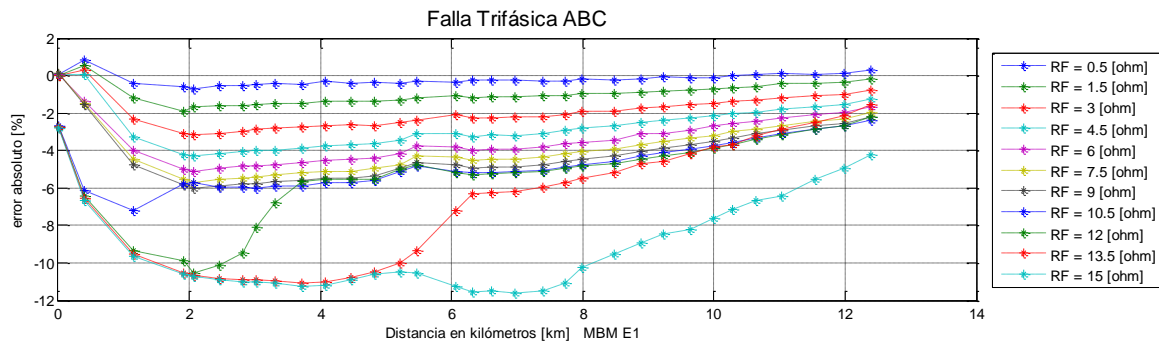


Figura 4. 25. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de carga S_{cte} .

Adicionalmente, el modelo que mayor diferencia presenta en la mayoría de los casos, es el modelo de S_{cte} , ya que en este caso es el modelo de la carga que mas se aleja de la condición nominal o base, como se expuso en el análisis anterior.

✓ Variación aleatoria de la carga [80 - 100]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de media carga (Carga 2).

a) Falla monofásica (AT)

Para el modelo de Z_{cte} la curva de desempeño presenta el mismo comportamiento que a condición nominal. Para el modelo de I_{cte} y el híbrido se presenta un pequeño aumento en el rango de error (-2% a 7.0%), y presentan un comportamiento similar entre si, esto se debe a que el modelo híbrido es 80% de I_{cte} y 20% Z_{cte} . El modelo de S_{cte} presenta un aumento mayor en el error con un rango entre -3% a 12%. Esta diferencia notoria, se debe a que el circuito a condición nominal o base esta modelado como Z_{cte} , y el modelo de S_{cte} es el que mas se aleja en comportamiento con respecto al de condición nominal, como se expuso previamente.

Así, si se tuviera el mismo modelo de la carga a condición nominal para cada modelo analizado, se presentaría un comportamiento similar a los obtenidos bajo esta condición para cada modelo de la carga. De allí que el modelo de la carga influye directamente sobre la localización de la falla para los MBM.

En la figura 4.26 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 80% y el 100% de la carga nominal, para este tipo de falla.

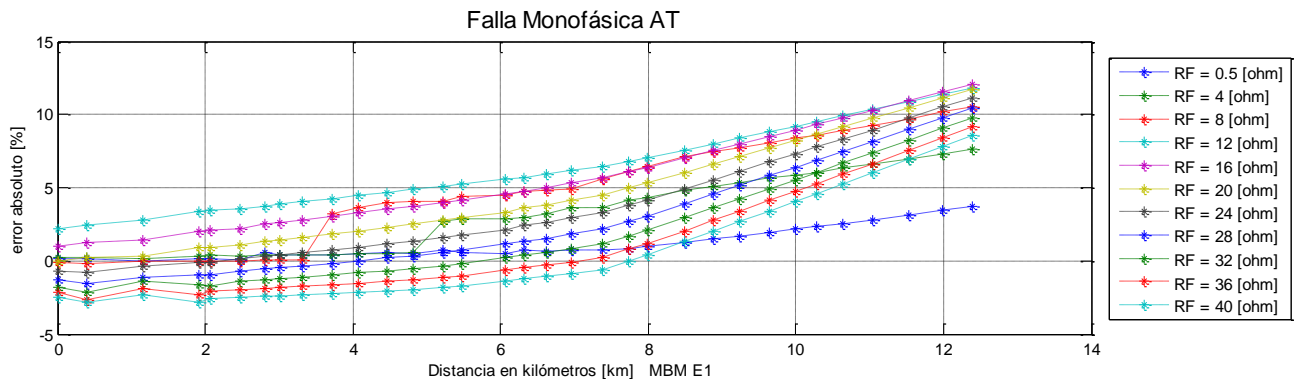


Figura 4. 26. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [80 - 100] %, para modelo de S_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

En esta condición, para el modelo de Z_{cte} se nota una reducción en el error de estimación con un rango entre -0.5% a 2.7%. Para los modelos de I_{cte} y el híbrido se presenta un comportamiento similar entre los mismos, debido a su composición, como se expuso anteriormente, con un leve aumento en el rango de error entre 0% a 4.5%. Para el modelo de S_{cte} se presenta un aumento mayor en el error con un rango que oscila entre 0% a 7%, debido a lo expuesto previamente. Adicionalmente, todos los modelos de carga analizados, presentan un comportamiento de subestimación de la distancia a la falla.

Como se expuso antes, las diferencia en las curvas de desempeño entre los tipos de falla es debido a la técnica de localización de fallas, ya que dependiendo del desarrollo del MBM para cada tipo de falla, los resultados de las curvas de desempeño son diferentes. En la figura 4.27 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a condición aleatoria de carga entre el 80% y el 100% de la carga nominal, para este tipo de falla.

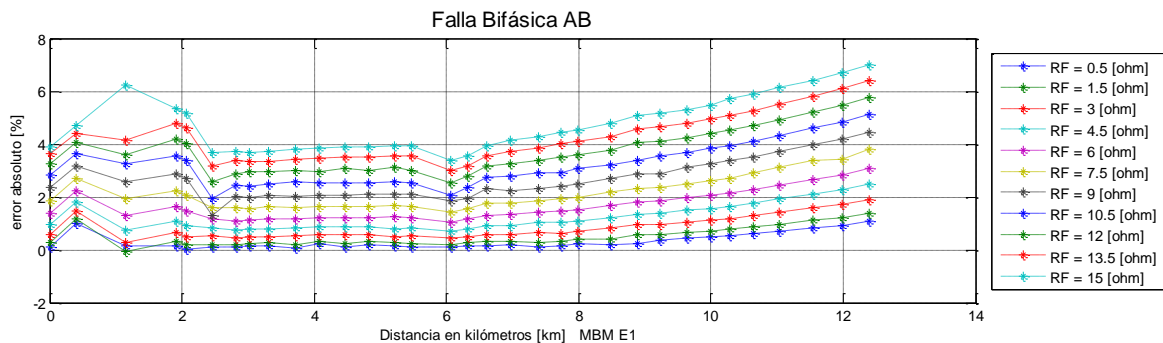


Figura 4. 27. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [80 - 100] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

Se presenta un comportamiento similar a la curva de desempeño a condición nominal con los diferentes modelos de la carga. Para el modelo de Z_{cte} , se mantienen los errores. Para el modelo de I_{cte} y el híbrido, se presenta un aumento en el error con un rango que oscila entre -10% a 1%. Para el modelo de S_{cte} se presenta un aumento en el error con las resistencias de falla más altas oscilando en un rango entre -16% a 3%. En la figura 4.28 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

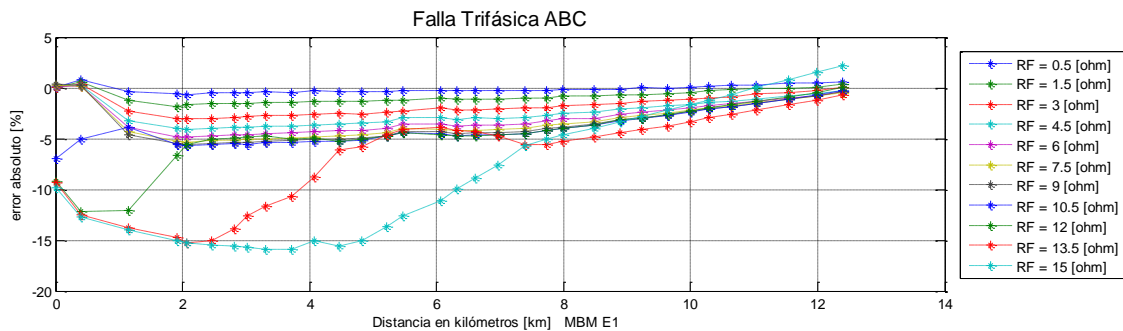


Figura 4. 28. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .

El índice de impedancia α calculado con la ecuación (3.36) para esta variación de la carga es aproximadamente 5, el cual es cercano a la condición nominal. En este caso, la incertidumbre en la variación de la magnitud y el modelo de la carga, hace que los errores aumenten con respecto del caso a condiciones nominales.

✓ Variación aleatoria de la carga [110 - 130]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de alta carga (Carga 3).

a) Falla monofásica (AT)

Para los diferentes modelos de la carga se presentó un aumento en el error en las curvas de desempeño, con un comportamiento similar al nominal. El modelo que menor aumento presentó es el modelo de Z_{cte} (entre -1% a 8%), y el que mayor aumento presentó es el modelo de S_{cte} , con un rango entre -5% a 16%.

El comportamiento anterior era esperado, como se explico previamente, debido a que el índice de impedancia α para los escenarios con los modelos de carga y esta variación es bajo (alrededor de 3.5), por tanto se espera que el desempeño del localizador empeore, como se comprueba por medio de las simulaciones. Adicionalmente, como se menciono, el modelo que mayor diferencia presenta es el de S_{cte} , este a su vez presenta el índice de impedancia α más bajo (3.39). Por otro lado, el modelo de Z_{cte} es el que menor error presenta, debido a que su índice α es el mas alto para esta variación (3.82). Un índice α alto indica un mejor desempeño y viceversa, como se expuso anteriormente.

En la figura 4.29 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

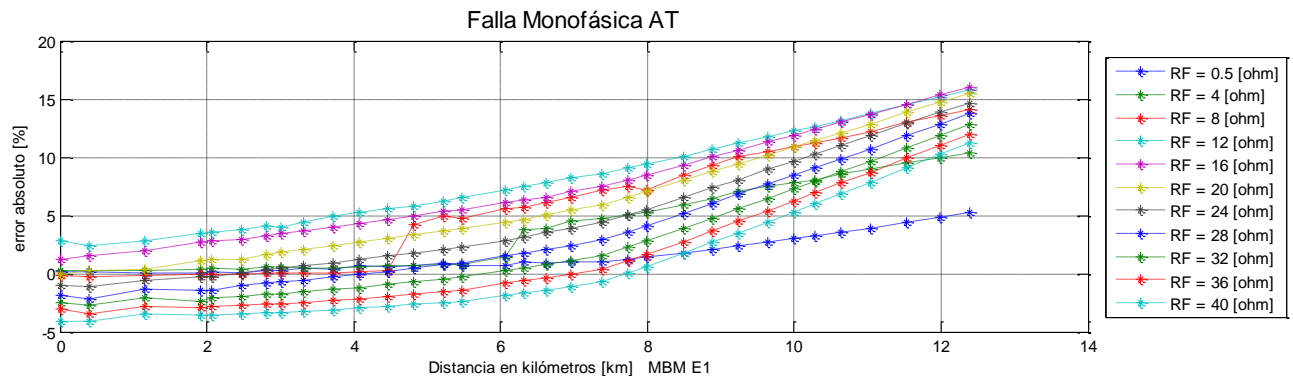


Figura 4. 29. Curva de desempeño en caso de falla monofásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .

b) Falla bifásica (AB)

Para el modelo de Z_{cte} se presenta un comportamiento similar en la curva de desempeño, con un aumento en el error de estimación (entre -0.5% a 3.6%). Para los modelos de I_{cte} y el híbrido, se presentó un aumento mas pronunciado en el error de estimación, con un rango que oscila entre 0% a 6%. El modelo de S_{cte} presenta el mayor error en los modelos analizados (entre 0% a 10%). Todos los modelos presentaron un comportamiento de subestimación en las curvas de desempeño analizadas.

Este comportamiento se debe a lo expuesto anteriormente, ya que el sistema se encuentra con carga alta y el índice de impedancia α es alto. Finalmente, en la figura 4.30 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

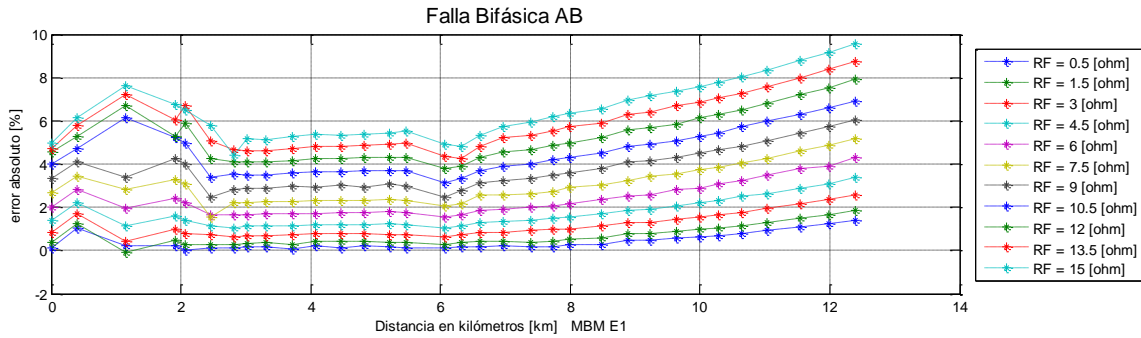


Figura 4. 30. Curva de desempeño en caso de falla bifásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .

c) Falla trifásica (ABC)

El comportamiento de las curvas de desempeño para los diferentes modelos es similar, pero con aumentos en el rango de error, como se había previsto por medio del índice de impedancia α propuesto. El modelo que mayor error presenta es el modelo de S_{cte} y el de menor error el de Z_{cte} , como se esperaba y se expuso previamente. En la figura 4.31 se muestra el peor de los casos en las pruebas con los escenarios a esta condición aleatoria de carga y para este tipo de falla.

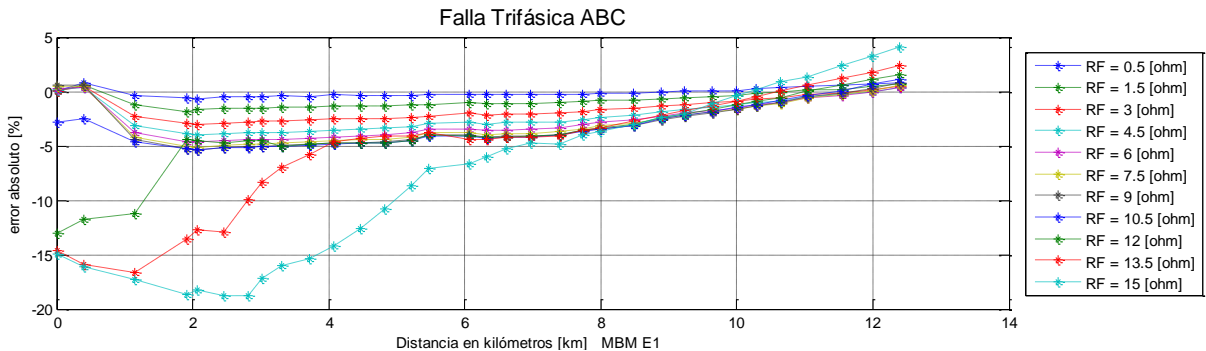


Figura 4. 31. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de la carga [110 - 130] %, para modelo de S_{cte} .

4.3.3.1.3. Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente

✓ **Variación aleatoria de la tensión de la fuente [0.95 – 1.05]p.u**

Como se menciono, para esta variación se tomaron los modelos de Z_{cte} y S_{cte} , ya que son los que presentan los errores menores y mayores respectivamente. A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados, para cada tipo de falla y para este escenario de variación (Tensión).

a) Falla monofásica (AT)

Para el modelo de Z_{cte} , se presenta el mismo comportamiento que a condición nominal. Por otro lado, para el modelo de S_{cte} , se observa un aumento en el error de estimación con respecto del caso nominal, oscilando entre -3% a 14% para las diferentes resistencias de falla analizadas. Este comportamiento se debe a que el sistema a condición nominal se encuentra con un buen nivel de carga y es modelado como Z_{cte} y al afectar las condiciones de tensión en la fuente, el modelo de S_{cte} tiende a mantener su potencia a pesar de la variación. Además, de la consideración del modelo de Z_{cte} en el desarrollo de la técnica de localización, como se menciono anteriormente.

b) Falla bifásica (AB)

El modelo de Z_{cte} presento un comportamiento similar al nominal, con el mismo rango de error. Ahora bien, con el modelo de S_{cte} presento un aumento del error con una separación mas notoria en las curvas de desempeño para las diferentes resistencias de falla analizadas con un rango entre 0% a 8%.

c) Falla trifásica (ABC)

Los modelos de la carga analizados presentan un comportamiento similar al nominal, pero el modelo de S_{cte} presenta un aumento en el error de estimación (entre -15% a 6%).

En la figura 4.32 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de tensión en la fuente entre el 95% y el 105% de la tensión nominal en la subestación.

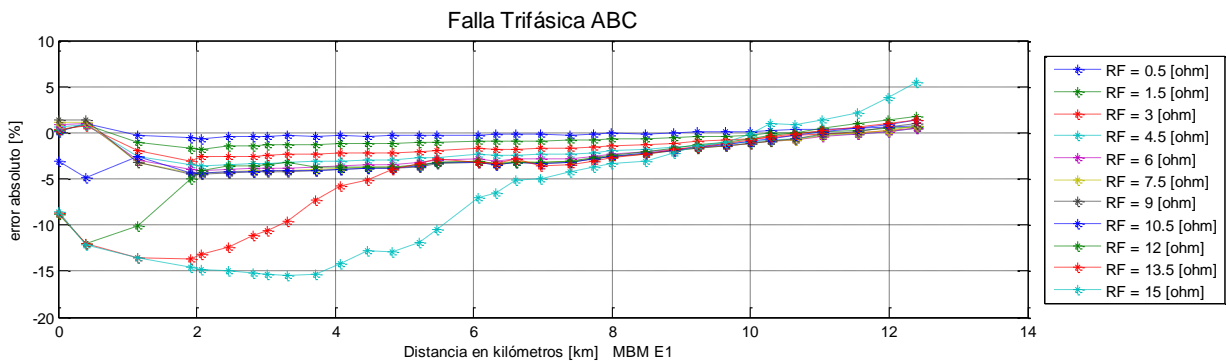


Figura 4. 32. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de tensión en la fuente [0.95 – 1.05] p.u, para modelo de S_{cte}

De acuerdo a los tres tipos de fallas analizadas, se dice que para la variación en la tensión de la fuente, el localizador MBM E1 se ve afectado cuando se modela con un modelo de la carga distinto al considerado a condiciones nominales, cuando el sistema esta relativamente cargado, como lo indica el índice de impedancia α para la condición nominal.

4.3.3.1.4. Variaciones de la longitud del conductor de la línea

✓ Variación aleatoria de longitud del conductor [95 – 98]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de longitud baja de la línea (Línea 1).

a) Falla monofásica (AT)

En general se presenta un comportamiento de subestimación para el radial analizado con el los dos modelos de carga (Z_{cte} y S_{cte}). El error en la estimación aumento, especialmente al final del radial. Lo anterior se debe a que la disminución de a longitud de la línea afecta directamente al localizador, pues este tendrá una menor impedancia al realizar el cálculo de la distancia de falla, como se expuso anteriormente; además de la diferencia entre los modelos de la carga. El mayor rango de error alcanzado lo presento el modelo de S_{cte} (entre -3% a 16%).

b) Falla bifásica (AB)

En este caso el error aumento, presentando un comportamiento de subestimación a lo largo del radial para los diferentes modelos de carga y para las diferentes resistencias de falla analizadas. El rango de error mayor fue presentado por el modelo de S_{cte} (entre 0% y 10%), con una mayor separación en las curvas para cada resistencia de falla. Como se explico anteriormente, esto se debe a la disminución en la variación de la longitud de la línea.

c) Falla trifásica (ABC)

En la figura 4.33 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 95% y el 98% de la longitud nominal de la línea.

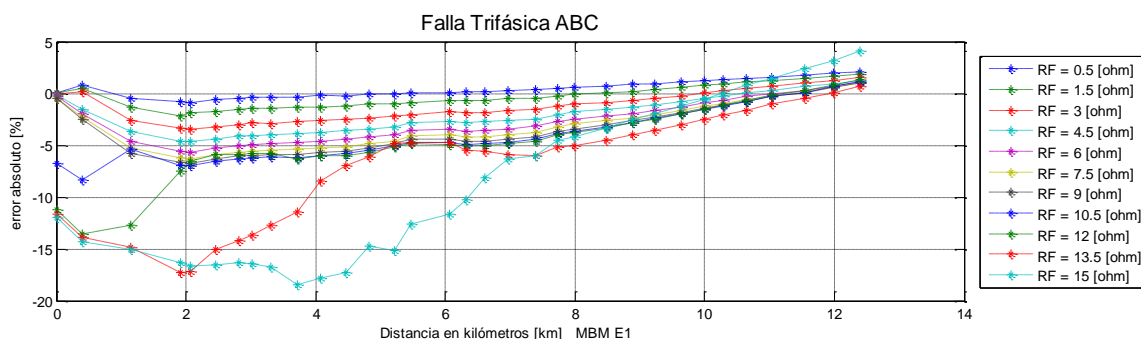


Figura 4. 33. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .

En la falla trifásica, se presenta un comportamiento de sobre-estimación en la mayor parte del radial analizado para los diferentes modelos de la carga, con un rango de oscilación del error entre -18% a 5% para el modelo con mayor diferencia (S_{cte}). Lo anterior se explica por la disminución en la longitud del conductor dada por la variación realizada y la diferencia entre los modelos de la carga.

✓ Variación aleatoria de la longitud del conductor [98 – 102]%

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación de longitud media de la línea (Línea 2).

a) Falla monofásica (AT)

Para el modelo de Z_{cte} se presenta un comportamiento similar al obtenido a condición nominal, con un rango de error entre -0.5% a 6%. Este comportamiento se esperaba, pues el rango de variación de la longitud es aproximadamente alrededor del 100% de la longitud nominal y con el mismo modelo de la carga, lo que hace que las curvas de desempeño sean similares. Por otro lado, para el modelo de S_{cte} se presenta un error mayor en la curva de desempeño (entre -3% a 13%), pero menor al obtenido con la variación anterior para la misma falla, lo que indica que tanto el modelo de la carga como la variación en la longitud del conductor afectan el desempeño del localizador.

b) Falla bifásica (AB)

En este caso, con el modelo de Z_{cte} el comportamiento de la curva de desempeño es similar al de condición nominal, como se esperaba por lo expuesto previamente. Para el modelo de S_{cte} se presenta un mayor error para este tipo de falla con un rango entre 0% y 7%; esto se debe al modelo de la carga, que tiene una diferencia notoria con el modelo de condición nominal (Z_{cte}).

c) Falla trifásica (ABC)

En la figura 4.34 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 98% y el 102% de la longitud nominal de la línea.

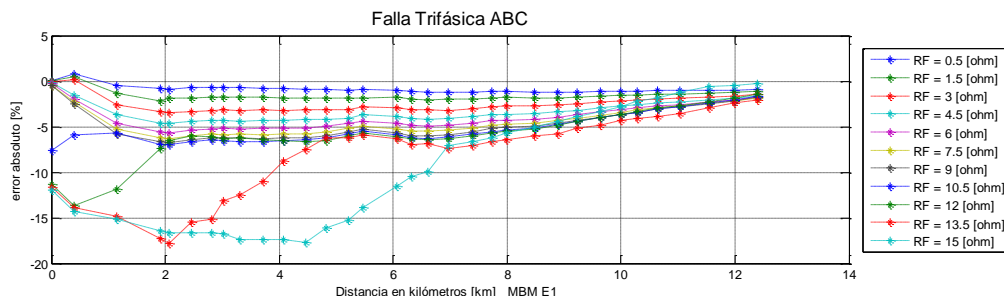


Figura 4. 34. Curva de desempeño en caso de falla trifásica para modelo de S_{cte} .

Para falla trifásica, se observa un aumento en el error para los dos modelos de la carga analizados, pero con un mayor aumento para el modelo de S_{cte} (-18% a 1%). Adicionalmente, se presenta un comportamiento de sobre-estimación en la mayoría del radial analizado.

✓ **Variación aleatoria de la longitud del conductor [102 – 105]%**

A continuación se presenta el análisis de las diferentes gráficas de desempeño obtenidas para los diferentes modelos de la carga analizados (Z_{cte} y S_{cte}) y para cada tipo de falla, en caso de escenario de variación alta de longitud de la línea (Línea 3).

a) Falla monofásica (AT)

En este caso, el modelo de Z_{cte} presento una disminución del rango de error (entre -1.8% a 3%) y tiende a sobre-estimar la falla. Ahora bien, el modelo de S_{cte} presenta un error mayor que a condición nominal entre -3% a 11%, pero este error es menor que el presentado para la misma falla con la condición de variación anterior.

Este comportamiento de sobre-estimación se debe a que la variación realizada es de aumento de la longitud del conductor, lo cual hace que la impedancia vista por el localizador debido a las líneas sea mayor y éste tienda a sobre-estimar la falla. Si el localizador presenta sobre-estimación, esta se ve intensificada, si por el contrario presentaba subestimación, con el aumento de la longitud esta se ve disminuida, como ocurrió en este caso.

b) Falla bifásica (AB)

Con el modelo de Z_{cte} se presenta un comportamiento sobre-estimación a lo largo del radial analizado, con un rango de error entre -2.5% a 1%. Para el caso del modelo de S_{cte} el localizador tiene a sobre-estimar mas la falla, y en algunos caso el error se va disminuyendo, presentando un rango de error entre -2.2% a 7%. Este comportamiento se debe a lo expuesto anteriormente, debido al aumento de la longitud del conductor.

c) Falla trifásica (ABC)

En este caso se presenta un aumento del error en la sobre-estimación presentada por la curva de desempeño para los dos modelos de la carga propuesto. Esto se debe a que a condición nominal el desempeño del localizador era de sobre-estimación, entonces al realizar el aumento de la longitud el comportamiento de sobre-estimación se vio aumentado y el localizador tiende a sobre-estimar mas la falla, aumentando el error, como se explico anteriormente. Adicionalmente, el modelo de S_{cte} presento el error mas pronunciado para este tipo de falla (entre -18% a 1%). En la figura 4.35 se muestra el peor de los casos en las pruebas con el escenario a condición aleatoria de longitud de los conductores entre el 102% y el 105% de la longitud nominal de la línea.

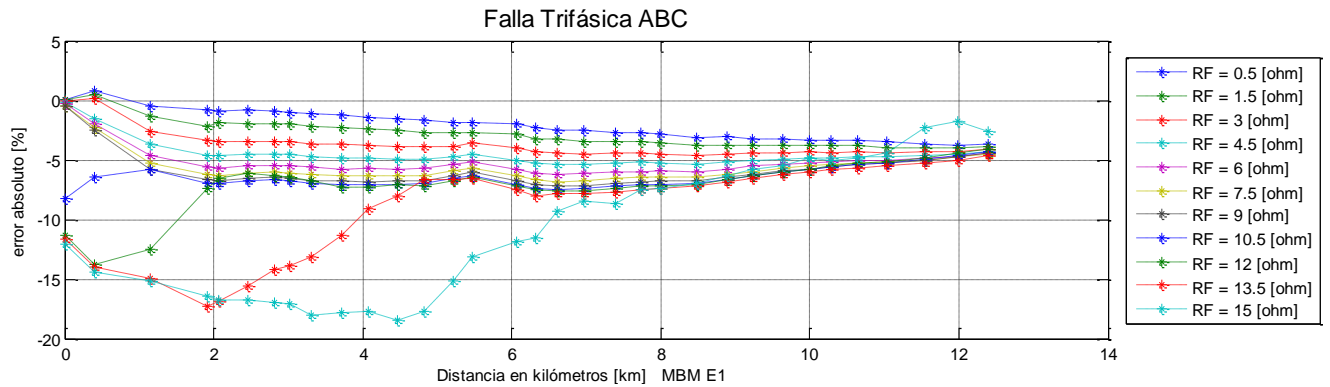


Figura 4. 35. Curva de desempeño en caso de falla trifásica a condición aleatoria de longitud de los conductores [102 – 105] %, para modelo de S_{cte} .

En general, para las fallas trifásicas se presento un aumento del error mas pronunciado, para los diferentes modelos de la carga, con las variaciones propuestas.

4.3.3.1.5. Tablas de resumen de los principales resultados para el sistema de prueba P2

En las tablas 4.13 a 4.16 se muestra el resumen del análisis de sensibilidad.

Tipo de falla	Error absoluto máximo para la Condición Promedio - Nominal [%] MBM_E1
1 ϕ	-0.5 a 7.0
2 ϕ	0.0 a 3.5
3 ϕ	-6.0 a 1.0

Tabla 4. 13. Rango de error a condición nominal.

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1			
		Zcte	Icte	Scte	Hibrido
Carga baja [30-60]	1 ϕ	-0.8 a 3.0	-1.2 a 3.8	-1.8 a 6.2	-1.0 a 3.5
	2 ϕ	-0.8 a 1.0	-0.6 a 1.8	0.0 a 3.0	-0.7 a 1.7
	3 ϕ	-6.5 a 1.0	-8.0 a 1.0	-12.0 a 1.0	-8.0 a 1.0
Carga media [80-100]	1 ϕ	-0.8 a 6.0	-2.0 a 7.0	-3.0 a 12.0	-1.8 a 7.0
	2 ϕ	-0.5 a 2.7	0.0 a 4.5	0.0 a 7.0	0.0 a 4.0
	3 ϕ	-6.2 a 1.0	-10.0 a 1.0	-16.0 a 3.0	-9.0 a 1.0
Carga alta [110-130]	1 ϕ	-1.0 a 8.0	-2.0 a 10.0	-5.0 a 16.0	-2.0 a 9.0
	2 ϕ	-0.5 a 3.6	0.0 a 6.0	0.0 a 10.0	0.0 a 5.5
	3 ϕ	-6.0 a 1.0	-11.0 a 2.5	-18.0 a 5.0	-10.0 a 2.0

Tabla 4. 14. Rango de error para variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1	
		Zcte	Scte
Tensión aleatoria de la Fuente [0.95 – 1.05]	1 ϕ	0.0 a 7.0	-3.0 a 14.0
	2 ϕ	0.0 a 3.5	0.0 a 8.0
	3 ϕ	-5.0 a 2.0	-15.0 a 6.0

Tabla 4. 15. Rango de error para variación aleatoria de la fuente.

Escenario	Tipo de falla	Error absoluto máximo para el escenario [%] MBM_E1	
		Zcte	Scte
Longitud baja de la Línea [95 – 98]	1 ϕ	0.0 a 8.5	-3.0 a 16.0
	2 ϕ	0.0 a 5.0	0.0 a 10.0
	3 ϕ	8.0 a 2.0	-18.0 a 5.0
Longitud media de la Línea [98 – 102]	1 ϕ	-0.5 a 6.0	-3.0 a 13.0
	2 ϕ	-0.6 a 2.0	0.0 a 7.0
	3 ϕ	-8.0 a 1.0	-18.0 a 1.0
Longitud alta de la Línea [102 - 105]	1 ϕ	-1.8 a 3.0	-3.0 a 11.0
	2 ϕ	-2.5 a 1.0	-2.2 a 7.0
	3 ϕ	-8.5 a 1.0	-18.0 a 1.0

Tabla 4. 16. Rango de error para variación aleatoria de la longitud de los conductores.

4.3.3.1.6. Conclusiones MBM E1

✓ A condición nominal:

El localizador presenta un buen desempeño y no se observan errores considerables para los diferentes tipos de falla analizados. Se puede decir que las fallas monofásica y trifásica presentan el rango de error más alto a condición nominal.

✓ Variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga

El MBM E1, cambio su desempeño para las diferentes variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga, mostrando en algunos casos errores altos. También, los errores en los diferentes modelos de la carga, aumentaron a medida que aumentaba la variación en la magnitud de la carga para cada tipo de falla analizado con el mismo modelo, como se observa en la tabla 4.14 para la variación del modelo y la magnitud de la carga.

Cuando el sistema se encuentra poco cargado, el desempeño del localizador mejoro para el modelo de Z_{cte} , como se pudo comprobar por medio de las simulaciones. Al igual que el índice de impedancia (α) propuesto ayuda a predecir el comportamiento del desempeño del localizador. Además, cuando el sistema de alimentación presentaba un modelo de carga distinto al de condición nominal, se presentó un leve aumento en el error de estimación para los modelos de I_{cte} y el híbrido en la falla trifásica. Para el modelo de S_{cte} se presentaron errores mayores. Este aumento del error en los casos de modelo de la carga diferente al nominal para baja carga, se debe a que el modelo de la carga influye en las señales de

tensión y corriente del circuito, haciendo que el localizador presente diferencias entre las curvas de desempeño, como se expuso anteriormente.

Ahora bien, para una variación media de la carga el rango de error en el modelo de Z_{cte} se mantuvo, mientras que para modelos de la carga como el I_{cte} y el híbrido se presenta aumentos leves en el error para las fallas monofásicas y bifásicas; con fallas trifásicas el error era mas pronunciado. Para el modelo de S_{cte} se presentaron errores mayores para las fallas analizadas. Así, si se tuviera el mismo modelo de la carga a condición nominal para cada modelo analizado, se presentaría un comportamiento similar a los obtenidos bajo esta condición para cada modelo de la carga. De allí que el modelo de la carga influye directamente sobre la localización de la falla para los MBM.

Por otra parte, cuando el sistema de alimentación presento una carga alta, el valor del índice α disminuyo, presentando un peor rendimiento, debido a que la impedancia vista desde la subestación se parece mas a la resistencia de falla base, lo cual dificulta la tarea de localización de fallas.

Finalmente, para la mayoría de los casos el modelo de la carga que mayor error presenta en la localización de la falla es el modelo de S_{cte} , esto se debe a que es el modelo que más se aleja del caso de condición nominal (Z_{cte}). Finalmente, el modelo que menor error presenta en los diferentes escenarios estudiados es el modelo de Z_{cte} , como se expuso previamente, esto se debe a que la técnica de localización de falla esta desarrollada considerando este modelo de la carga. Por tanto es importante considerar el modelo de la carga al realizar las tareas de localización de fallas, para obtener una mejor estimación de la falla.

✓ **Variaciones de la magnitud de la tensión de la fuente**

Como conclusión general, de acuerdo a los tres tipos de fallas analizadas, se dice que para la variación en la tensión de la fuente, el localizador MBM E1 se ve afectado cuando se modela con un modelo de la carga distinto al considerado a condiciones nominales, cuando el sistema esta relativamente cargado, como lo indica el índice de impedancia α para la condición nominal del circuito analizado.

✓ **Variaciones de la longitud del conductor de la línea**

Como conclusión general, el desempeño de la metodología MBM E1 se ve afectada por las variaciones en la longitud del conductor de la línea cuando éstas son notorias. Adicionalmente, dependiendo del modelo de la carga usado con la variación de la longitud, el desempeño del localizador se veía menos o mas afectado.

Si la variación involucra un decremento en la longitud del conductor, el desempeño de la metodología tiende a subestimar más la falla, por esta razón cuando se tiene un error de subestimación este aumenta, como se explico anteriormente y se puede notar en las curvas obtenidas y la tabla 4.16.

Si la variación involucra un incremento de la longitud del conductor de la condición nominal, el desempeño de la metodología se afecta y tiende a sobrestimar la distancia de falla (ver tabla 4.16).

4.3.3.2. Análisis con método de localización de fallas basado en Máquinas de Soporte Vectorial – SVM (MBC)

En total en el circuito de prueba P2 se simularon 39204 fallas que quedan disponibles para parametrizar, entrenar y validar el MBC. En este análisis se muestran los resultados más relevantes.

4.3.3.2.1. Zonificación

El circuito P2 se divide en 8 zonas, como se muestra en la figura 4.36. Este criterio de zonificación se realizó siguiendo lo expuesto en [GUTI11].

Los nodos que corresponden a cada zona y el número de fases por cada nodo se muestran en la tabla 4.17.

Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo	Zona	Nodos	Tipo
1	1	3φ	3	12	3φ	5	35	3φ	7	24	3φ
	2	3φ		13	3φ		36	3φ		25	3φ
	3	3φ		14	3φ		37	3φ		26	3φ
	4	3φ		15	3φ		38	3φ		27	3φ
	5	3φ		16	3φ		39	3φ		28	3φ
2	6	3φ	4	17	3φ	6	23	3φ	8	29	3φ
	7	3φ		18	3φ		40	3φ		30	3φ
	8	3φ		19	3φ		41	3φ		31	3φ
	9	3φ		20	3φ		42	3φ		32	3φ
	10	3φ		21	3φ		43	3φ		33	3φ
	11	3φ		22	3φ		44	3φ		34	3φ

Tabla 4. 17. Zonificación del circuito de prueba P2

La parametrización y el entrenamiento se realizaron teniendo en cuenta los criterios expuestos en [GIL11], [GUTI11]. En este caso, se parametrizo con el circuito a condición nominal para cada modelo de la carga para las variaciones en la magnitud de la carga y de la tensión de la fuente. En caso de la variación de la longitud se parametrizo con el escenario de la variación de longitud alrededor de la nominal [98 -102]%.

Los tiempos de simulación al realizar la parametrización para cada uno de los diferentes escenarios de variación fueron menores a 2.5 horas.

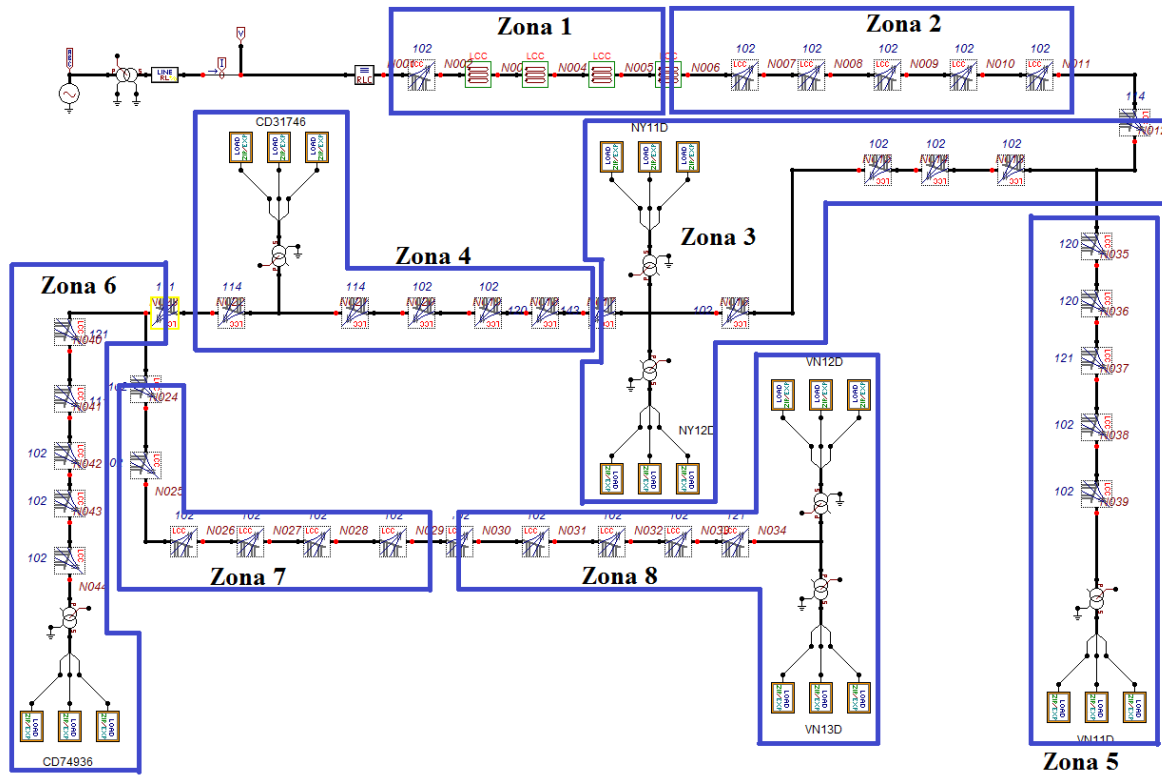


Figura 4. 36. Zonificación del circuito prueba P2

4.3.3.2.2. Resultados y análisis

Los descriptores de entrada al MBC son las variaciones en la tensión, la corriente, la variación del ángulo de la tensión y la variación del ángulo de la corriente (dV , dI , $d\theta_V$ y $d\theta_I$). Para cada uno de los descriptores mencionados se tienen las medidas de fase y de línea. En total se evalúan 3 combinaciones de descriptores por falla.

Inicialmente, con los resultados obtenidos de la parametrización, se entreno con el escenario de variación total para carga, línea y fuente; y luego se valido con los otros escenarios de variación adicionales al realizado, pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, al igual que se expuso para el circuito anterior. Finalmente, siguiendo el lineamiento expuesto por [GIL11], [GUTI11], se realizo el entrenamiento con todas las condiciones de operación disponibles para cada variación (carga, fuente y línea) y se realizó la validación con la misma base de datos. Es importante anotar, que los nodos tomados en el entrenamiento son diferentes de los nodos tomados para la validación. Las tablas 4.18, 4.19 y 4.20 muestran los resultados obtenidos con la SVM (MBC). Los errores más bajos para cada tipo de falla y modelo de la carga se muestran subrayados.

Ahora bien, para la variación de la carga se tiene que para la falla monofásica el modelo de S_{cte} presento la menor precisión para todas las combinaciones de descriptores, con un rango de precisión entre 89.86% a 97.89%. El modelo con mejor precisión fue el modelo de Z_{cte} ; en este caso se puede evidenciar que el modelo de la carga afecta a la precisión del

localizador, además si no se entrenaba con todas las condiciones de operación disponibles para la variación el desempeño era bajo, como se expuso anteriormente. Para los escenarios de variación de la carga la precisión oscilo entre (87.27% a 100%). Para falla bifásica el modelo con menor precisión continua siendo S_{cte} y para la falla trifásica el modelo de I_{cte} . En general, se nota una variación en la precisión del MBC de acuerdo al modelo de la carga analizado.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO					
Todos los escenarios de carga					
CONDICION DE VALIDACIÓN					
Todos los escenarios de carga					
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabú-SVM (MBC)			
		Zcte	Icte	Scte	Hibrido
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	96.84	<u>89.86</u>	93.68
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99.81	97.32	95.12	99.81
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99.81	100.00	97.89	100.00
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	94.74	98.56	<u>87.85</u>	94.55
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99.90	95.98	98.09	96.84
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	98.18	96.65	97.70	97.32
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	91.67	<u>87.27</u>	89.57	93.11
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	96.08	94.93	95.79	96.56
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	96.65	96.65	96.46	96.65

Tabla 4. 18. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la carga.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO			
Escenario de Tensión			
CONDICION DE VALIDACIÓN			
Escenario de Tensión			
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabú-SVM (MBC)	
		Zcte	Scte
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	<u>98.56</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	99.04
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	97.61
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	<u>97.61</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	98.56
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	98.56
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	100.00	94.74
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	94.74
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	95.22	<u>94.26</u>

Tabla 4. 19. Entrenamiento y validación con escenario para variación de la tensión.

CONDICION DE ENTRENAMIENTO			
Todos los escenarios de Línea			
CONDICION DE VALIDACIÓN			
Todos los escenarios de Línea			
Tipo de falla	Descriptores	Precisión [%] Tabú-SVM (MBC)	
		Zcte	Scte
Monofásica (A-g)	dV, dI, dV_L, dI_L	99.64	98.56
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	97.25	97.01
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99.04	<u>96.89</u>
Bifásica (AB)	dV, dI, dV_L, dI_L	<u>91.87</u>	92.46
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	98.33	<u>93.66</u>
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	100.00	95.45
Trifásica (ABC)	dV, dI, dV_L, dI_L	99.76	<u>88.52</u>
	$dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	98.44	94.26
	$dV_L, dI_L, d\theta_{VL}, d\theta_{IL}$	99.04	95.45

Tabla 4. 20. Entrenamiento y validación con todos escenarios planteados para variación de la línea.

Para la variación de la tensión en la fuente (Tabla 4.18), en general se tiene un muy buen desempeño del localizador (MBC) para los tres tipos de falla analizados, especialmente con el modelo de Z_{cte} . Para el modelo de S_{cte} la precisión es menor, pero sigue siendo buena (entre 94.26% a 99.04%).

Finalmente, para la variación de la longitud de los conductores mostrado en la tabla 4.20, se encuentra que el modelo de Z_{cte} , presenta un buen desempeño para las fallas analizadas, con un rango de precisión del método (MBC) entre 91.87% a 100%. El modelo de S_{cte} presenta menor precisión para los mismos tipos de falla entre 88.52% a 98.56%. En este caso al igual que para la variación de la carga, si el MBM no era entrenado con todas las condiciones de operación, se presentaba una baja precisión.

4.3.3.2.3. Conclusiones MBC

Como se puede observar en los resultados para este localizador, cuando se validan condiciones similares a las de entrenamiento el clasificador tabú-SVM presenta, en general, un buen rendimiento.

Así, si se posee una buena base de datos de entrenamiento para el localizador (MBC), este presentara resultados satisfactorios para las diferentes variaciones realizadas. Adicionalmente, el modelo de la carga hace que se produzcan variaciones en la precisión del localizador. Finalmente, se dice que el modelo es sensible a las variaciones de carga y longitud del conductor, si no se entrena con las suficientes condiciones de operación.

Capítulo 5

5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones generales

Una metodología para el modelado de circuitos de distribución enfocada a estudios de localización de fallas fue propuesta. Esta metodología ayuda a reproducir adecuadamente el sistema bajo estudio y reproduce de forma correcta las señales de tensión y corriente que son utilizadas por los localizadores de falla, como se mostró por medio de las simulaciones realizadas.

Se desarrolló e implementó un nuevo bloque para representar la carga por medio de la herramienta de *Models* del ATP/EMTP, el cual permite simular el modelo de la carga que se desee, teniendo la opción de modelar la carga de acuerdo a un modelo polinomial ZIP o exponencial. Este modelo usa uno de los *Models* predefinidos en el ATP/EMTP (Type-94) en su versión Norton non-transmission y su lenguaje de programación es el *fortran*. Además, fue desarrollado debido a que en la mayoría de aplicaciones de localización de falla encontradas en la literatura, solo se usa el modelo de Z_{cte} , por tanto era importante analizar el comportamiento de los localizadores con otros modelos de la carga. También, ya que el ATP/EMTP solo tenía la opción de modelar la carga con los elementos propios que este poseía como una rama de Z_{cte} .

El modelo de la carga codificado usando los *Models* del ATP, reproduce adecuadamente el comportamiento del sistema de alimentación considerando diferentes tipos de fallas como fue demostrado por las simulaciones presentadas en este documento de investigación. Adicionalmente, el modelo de la carga propuesto fue probado y validado en diferentes ambientes de simulación usados en el grupo de investigación ICE3. Al igual que fue fácilmente incluido en las herramientas desarrolladas por el grupo de investigación, para realizar variaciones de parámetros del circuito y simulación automática de fallas.

Un nuevo índice de relación basado en la impedancia de falla fue propuesto y validado, para obtener información de la representatividad de la carga del sistema respecto a una resistencia de falla predefinida ($R_{f_{Base}}$), que en este caso es la máxima resistencia de falla esperada. El índice α da una adecuada indicación del desempeño esperado para el localizador (MBM) considerando la incertidumbre asociada a los escenarios de carga propuestos.

El índice propuesto fue probado considerando una base compuesta por 32736 fallas para el sistema IEEE de 34 nodos y 39204 para el sistema de prueba P2, e incertidumbres como la variación de la carga, el tipo de falla y las resistencias de falla. Como se esperaba y de

acuerdo a las pruebas de desempeño, para bajos valores de α , el rendimiento del MBM es bajo y viceversa.

Adicionalmente, modelos de la carga no considerados previamente en la mayoría de documentos técnicos de localización de fallas, son ahora incluidos como un nuevo factor que influencia el desempeño de los localizadores (MBM y MBC).

También, la consideración de modelos de cargas reales ayuda a mejorar la eficiencia del localizador, y por otro lado, el índice de desempeño propuesto ayuda a tener una buena estimación del comportamiento esperado, proporcionando herramientas útiles para mejorar la calidad de la energía entregada al usuario final.

Por otra parte, modelos de elementos del circuito como las líneas y los transformadores se encuentran muy bien definidos en el ATP/EMTP, lo cual permite realizar simulaciones muy aproximadas a lo real, de acuerdo a los datos que se posea de los sistemas de distribución. Adicionalmente, el modelo de la fuente implementado, reproduce adecuadamente las señales de la subestación de distribución en estado estable.

Finalmente, de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado para los métodos de localización de fallas, parámetros de los elementos del circuito de distribución, como el modelo de la carga, la magnitud de la carga y la variación de la longitud de los conductores afectan significativamente a los localizadores de falla analizados (MBM y MBC). La variación en parámetros como la magnitud de la tensión, afecta en algunos casos, dependiendo del modelo de la carga y de la cargabilidad del sistema que se tenga bajo esas condiciones.

5.2. Conclusiones asociadas al MBM

El localizador presenta un buen desempeño bajo las condiciones nominales expuestas para cada circuito de prueba.

Para las diferentes variaciones en el modelo de la carga y la magnitud de la carga, el MBM muestra su desempeño, mostrando en algunos casos errores considerables. También, los errores en los diferentes modelos de la carga, aumentaron a medida que aumentaba la variación en la magnitud de la carga para cada tipo de falla analizado con el mismo modelo, como se observa en los resultados expuestos para la variación del modelo y la magnitud de la carga.

Cuando el sistema se encuentra poco cargado, en general el desempeño del localizador tiende a mejorar, como se pudo comprobar por medio de las simulaciones. Al igual que el índice de impedancia (α) propuesto ayuda a predecir el comportamiento del desempeño del localizador. Así, cuando el sistema de alimentación está con poca carga, el valor de α es mayor que el obtenido en condiciones nominales, lo que indica que la impedancia vista

desde la subestación es mayor que la resistencia de falla base. Entonces, tal como se obtiene en las curvas de rendimiento para el localizador analizado, se observa una reducción en el error de estimación en la mayoría de los casos.

Ahora bien, para una variación media de la carga el rango de error en el modelo de Z_{cte} se mantuvo, mientras que para los otros modelos de la carga se presentan aumentos en el error, en algunos casos más notorios. Esto se debe al modelo de condición nominal de los circuitos de prueba (Z_{cte}), así, si se tuviera el mismo modelo de la carga a condición nominal para cada modelo analizado, se presentaría un comportamiento similar a los obtenidos bajo esta condición para cada modelo de la carga. De allí que el modelo de la carga influye directamente sobre la localización de la falla para los MBM.

Por otra parte, cuando el sistema de alimentación presenta una carga alta, el valor del índice α disminuyo, presentando un peor rendimiento, debido a que la impedancia vista desde la subestación se parece mas a la resistencia de falla base, lo cual dificulta la tarea de localización de fallas.

Adicionalmente, para la mayoría de los casos de variación, el modelo de la carga que mayor error presenta en la localización de la falla es el modelo de S_{cte} , esto se debe a que es el modelo que más se aleja del caso de condición nominal (Z_{cte}). Finalmente, el modelo que menor error presenta en los diferentes escenarios estudiados es el modelo de Z_{cte} , como se expuso previamente, esto se debe a que la técnica de localización de falla esta desarrollada considerando este modelo de la carga. Por tanto es importante considerar el modelo de la carga al realizar las tareas de localización de fallas, para obtener una mejor estimación de la falla.

Para la variación de la magnitud de la tensión de la fuente, de acuerdo a los tres tipos de fallas analizadas, se dice que para esta variación, el localizador se ve afectado cuando se modela con un modelo de la carga distinto al considerado a condiciones nominales y cuando el sistema esta relativamente cargado.

Para los escenarios de variación de la longitud del conductor de la línea, el desempeño de la metodología se ve afectado cuando estas variaciones son notorias. Si la variación involucra un decremento en la longitud del conductor, el desempeño de la metodología tiende a subestimar más la falla, por esta razón cuando se tiene un error de subestimación este aumenta. Si por el contrario se tiene un comportamiento en el error nominal de sobrestimación, ante una variación de decremento de longitud el localizador tiende a disminuir este error. Finalmente, si la variación involucra un incremento de la longitud del conductor de la condición nominal, el desempeño de la metodología se afecta y tiende a sobrestimar la distancia de falla. Por esta razón, cuando se tiene sobre-estimación en el comportamiento de la gráfica inicialmente y se incrementa la longitud del conductor, este

error de sobre-estimación tiende a aumentar y el error en la subestimación tiende a disminuir.

5.3. Conclusiones asociadas al MBC

Como se puede observar en los resultados para este localizador, cuando se validan condiciones similares a las de entrenamiento el clasificador tabú-SVM presenta, en general, un buen rendimiento, en caso contrario los resultados no eran satisfactorios.

Considerando lo anterior, si se posee una buena base de datos de entrenamiento para el localizador (MBC), este presentará resultados satisfactorios para las diferentes variaciones realizadas. Adicionalmente, el modelo de la carga hace que se produzcan variaciones en la precisión del localizador.

Finalmente, se dice que el localizador es sensible a las variaciones del sistema, especialmente de carga y longitud del conductor, si no se entrena con las suficientes condiciones de operación.

5.4. Recomendaciones y trabajos futuros

Ya que los sistemas de distribución son una parte importante del sistema de potencia y están directamente relacionados con el usuario final, por lo que se requiere mantener altos niveles en la calidad de la energía, es importante seguir realizando y renovando esta clase de estudios, para mejorar los índices de continuidad de suministro del sistema. Adicionalmente, el modelo de la carga desarrollado puede ser usado en estudios diferentes a localización de fallas, ya que es una herramienta general que simula la carga para cualquier tipo de sistema, de acuerdo a los datos ingresados en el mismo, además se encuentra implementado como un bloque en ATP/EMTP.

Como se demostró la incertidumbre en el modelo de la carga y sus variaciones afectan la localización, entonces es recomendable realizar estudios de las curvas de carga del sistema para obtener su modelo de carga y utilizar procesos estocásticos, como simulación de Montecarlo u otro, para ajustar las curvas de carga a una función o distribución de probabilidad, para tener una mejor aproximación de la misma. Así, cuando ocurra un evento de falla se puede aplicar la distribución de probabilidad de acuerdo al día y la hora del evento por ejemplo, para obtener una mejor aproximación de la carga.

También, se deben desarrollar métodos de localización de fallas más robustos, que cubran falencias como la incertidumbre en el modelo de la carga y que consideren las diferentes cargas laterales a lo largo del circuito. Además, de poder considerar factores de utilización o compensación de corriente para tener un estimativo de la corriente que se va por la carga. En algunos casos también se podría realizar factores de compensación de tensión de acuerdo al modelo de la carga usado.

Bibliografía

[AGUE06] J. L. Aguero, M.B. Barbieri, and M.C. Beroqui, “Voltage depending load models. Validation by voltage step tests,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006.

[ANDE95] P. M. Anderson. “Analysis of Faulted Power System”. Wiley – IEEE Press. 1995.

[ANDR07] Andrzej Bien and Dariusz Borkowski and Andrzej Wetula. “*Estimation of power system parameters based on load variance observations – laboratory studies*”. Department of Measurement and Instrumentation, AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland. 9th conference. Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, 9-11. Octubre 2007.

[AREF07] S. A. Arefifar and W. Xu, *Fellow*. “*Tracking Power System Equivalent Circuit Parameters Using Steady State Measurements*”. Electrical and Computer Engineering Department of University of Alberta, Canada. 2007 39th North American Power Symposium (NAPS 2007).

[ATPR11] User Group. “Rule Book Alternative transient program (ATP)”. 2011. [Online]. Available: <http://www.emtp.org>

[BEDO12a] Bedoya-Cadena, A., Mora-Florez, J., Perez-Londoño, S. “Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica”. Revista EIA, Volumen 17, 2012.

[BEDO12b] A. Bedoya-Cadena, J. Mora-Florez, and S. Pérez-Londoño, “Extended Application of a Sequence Impedance Based Fault Location Technique Applied To Power Distribution Systems”. Presentad at Revista DYNA. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellin. 2012.

[BOLL93] M. Bollen. “Literature Search for reliability Data of Components in Electric Distribution Networks”. The Eindhoven University of Technology Netherlands. August 1993.

[BURG98] C. Burges. “A tutorial on support vector machines for pattern recognition”. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998.

[CANO08] E. A. Cano Plata, H. E. Tacca. “Modelado y simulación en electrónica de potencia con ATP”. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. Bogotá, Colombia. 2008. ISBN: 978-958-719-008-3

[CARD09] Curso de manejo del programa EMPT/ATP. Capítulo 2: Introducción al programa ATP. Ingeniero Leonardo Cardona Profesor de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - Facultad de Minas. [Online]. Available: <http://www.unalmed.edu.co/~lcardona/>

[CHAO95] C. Chao-Shun, W. Tsung-Hsien, L. Chung-Chieh and T. Yenn-Minn. "The application of load models of electric appliances to distribution system analysis". *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 10, No. 3. August 1995.

[CHOI04] M. Choi, S. Lee, D. Lee, and B. Jin, "A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 35–41, 2004.

[CORR12] Ever J. Correa Tapasco. "Mejoramiento de los índices de continuidad del servicio de energía eléctrica en sistemas de distribución, a partir de la determinación de la distancia a la falla". Colombia, 2012. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira.

[CREG95] Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG. "Código de Redes". Colombia: Resolución CREG 025 de 1995. Fecha de consulta: noviembre 2006. Disponible en: <http://domino.creg.gov.co/creg.nsf/normas?OpenFrameSet>

[CREG08] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, Resoluciones CREG 070 de 1998, CREG 096 de 2000, CREG 084 de 2002, CREG 097 de 2008.

[CROZ99] C. Croizer, W. Wisdom, "A power quality and reliability index based on customer interruption costs" *Power Engineering Review*, IEEE. Vol 19, Issue 4, April 1999. Pages: 59 – 61.

[DAS98] DAS R.: 'Determining the locations of faults in distribution systems'. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, Canada, 1998.

[DEGE00] J. Dagenhart. "The 40-ohms ground-fault phenomenon". *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000; 36 (1): 30-32.

[DIAS89] L.G. Dias and M.E. El-Hawary, "Nonlinear parameter estimation experiments for static load modelling in electric power systems," *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings C, vol. 136, pp. 68-77, 1989.

[DUBE96] L. Dubé. *Users Guide to Models in ATP*. April. 1996.

[DUTA10] Dután, Luis. "Modelación de transformadores para estudios de energización usando ATP-EMTP". CELEC EP TRANSELECTRIC. Quito, Ecuador. 2010. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3734>

[EMTP94] Tsu-huei Liu and Wscott. “Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) Theory book”. Branch of system engineering. Boneville Power Administration. U.S.A. 1994.

[GELL02] C. Gelling, “Power delivery system of the future” *Power Engineering Review*, IEEE Volume 22, Issue 12, Dec. 2002 Page(s): 7–12

[GIL11] W. J. Gil González. “Utilización de técnicas metaheurísticas en la búsqueda de parámetros óptimos para la calibración de las máquinas de soporte vectorial (MSV), para la localización de fallas en sistemas de distribución”. Colombia, 2011. Tesis de Pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira

[GONE86] T. Gonen. *Electrical Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill Publisher, Second Edition. 856 pages. New York, 1986.

[GUTI11] J. A. Gutiérrez. “Desarrollo de un localizador de fallas para sistemas de distribución utilizando máquinas de soporte vectorial para clasificación (SVMc) con ajuste inteligente de parámetros e índices de confianza”. Colombia, 2013. Tesis de Maestría en ingeniería eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira

[HAND96] P. Ju, E. Handschin, and D. Karlsson, “*Nonlinear dynamic load modelling: model and parameter estimation*,” *IEEE Transactions on Power System*, vol. 11, pp. 1689-1697, 1996.

[HERR12] A. Herrera-Orozco, S. Perez-Londoño, J. Mora-Flórez. “Load modeling for fault location in distribution systems with distributed generation” presented in *Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference*. September, 2012 / Montevideo – Uruguay.

[HERR13a] A. R. Herrera-Orozco, J. J. Mora-Flórez, S. Perez-Londoño. “An impedance relation index to predict the fault locator performance considering different load models”. *Journal Electric Power System Research*. ELSEVIER. 2013.

[HERR13b] A. Herrera-Orozco, A. Bedoya-Cadena, J. Mora-Flórez. “A robust fault locator for power distribution systems considering distributed generation and uncertainties in load”. *Transaction on power delivery IEEE*. 2013.

[HEVI99] Hevia Orlando. “*Comparación de los modelos de líneas en el ATP*”. *Revista Iberoamericana del ATP*. 1999

[HORP02] Høidalen, Hans K. Prikler, “ATPDraw manual”, version 3.5, October 2002.

[HORP09] Hans K. Høidalen, Bruce A. Mork, Francisco Gonzalez-Molina, Dmitry Ishchenko and Nicola Chiesa. “Implementation and verification of the Hybrid Transformer model in ATPDraw”. 2009. *7th International Conference on Power Systems Transients*.

Electric Power Systems Research. Journal ELSEVIER.

[IEEE04] IEEE *Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*, IEEE Std 37.114, Power System Relaying Committee 2004.

[IEEE08] P. Ju et al., “Comparisons between the Load Models with Considering Distribution Network Directly or Indirectly” in *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, 2008, pp. 1-5.

[IEEE13] Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 13 Node Test Feeder. [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>

[IEEE34] Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder. [Online]. Available: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>

[IEEE93] Task force on Load representation for dynamic performance analysis of power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, pp. 472-482, 1993.

[IEEE95] IEEE Taskforce, “Standard load models for power flow and dynamic performance simulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 1302-1313, 1995.

[JAVA09] H. A. Javad Sadeh “A new and accurate fault location algorithm for combined transmission lines using adaptive network-based fuzzy inference system”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, 2009, Pp. 1538-1545.

[KARL94] D. Karlsson and D. J. Hill, “Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 157-166, 1994.

[KERS02] W. H. Kersting. “Distribution system modeling and analysis”, New Mexico State University. Las Cruces, New Mexico. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. ISBN 0-8493-0812-7.

[KUND94] Kundur. P. “Power system stability and control”. Electric Power Research Institute. McGraw-Hill, inc. 1994.

[MARI13] J. G. Marín. “Análisis del efecto de la variación de los parámetros del modelo de un sistema de distribución sobre las metodologías de localización de fallas paralelas”. Colombia, 2013. Tesis de Maestría en ingeniería eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira

[MARQ04] D.Z. Marques, K.A. de Almeida, A.M. de Deus, A.R.G. da Silva, and W. da Silva, “A comparative analysis of neural and fuzzy cluster techniques applied to the characterization of electric load in substations”. 2004, pp. 908-913.

[MART82] J. R. Martí , “*Accurate modeling of frequency- dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 101 (1), p.p. 147 – 155, January, 1982.

[MORA06a] Mora J. “Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos basados en el Modelo y Métodos de Clasificación Basados en el Conocimiento”. España. 2006. Tesis Doctoral. Universidad de Girona. ISBN 978-84-690-4513-8

[MORA06b] Mora-Florez, J. Bedoya, J. Melendez, J. “Extensive Events Database Development Using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems.” *Transmission & Distribution Conference And Exposition: LA*, 2006.

[MORA08] Mora-Flórez, J, Carrillo, G, Meléndez, J. “Comparison Of Impedance Based Fault Location Methods For Power Distribution Systems”. *Electric Power Systems Research*. Vol. 28. 2008. Pp. 657–666.

[MORA09] J. Mora, G. Morales, H. Vargas. “Elimination of multiple estimation for fault location in radial power systems by using fundamental single-end measurements”. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 24, no. 3, july 2009.

[NODA05] T. Noda. “*Identification of a multiphase network equivalent of electromagnetic transient calculations using partitioned frequency response*”. IEEE Transactions on power delivery, vol. 20, no. 2, april 2005.

[NODA96] T. Noda, N. Nagaoka, A. Ametani, “*Phase domain modelling of frequency – Dependent transmission lines by means of and ARMA model*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996

[NOVO98] D. Novosel, D. Hart, and J. Myllymaki, “System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads” U.S. Patent 5,839,093, 1998.

[OROZ12] C. Orozco-Henao. J. Mora-Florez, and S. Pérez. “A robust method for single phase fault location considering distributed generation and current compensation”. *Transmission and Distribution Latin America Conference*. September, 2012 / Montevideo – Uruguay.

[PATI12a] J. F. Patiño-Duque. “Estudio del modelado de la carga en sistemas de distribución y su influencia para localización de fallas”. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira. Programa de ingeniería eléctrica. 2012.

[PATI12b] J. Patiño-Duque, A. Herrera-Orozco, J. Mora-Floréz. “Simulación y validación del modelo polinomial de la carga utilizando ATP/EMTP”. *Revista Scientia et Technica*.

Universidad Tecnológica de Pereira, Agosto 2012.

[PERE07] L. Pérez Hernández, S. Pérez, J. Bedoya, “Reducción de las características asociadas al problema de localización de fallas en sistemas de distribución”, *Scientia et Technica*, Año/vol XIII, No 35, pp. 127-132, 2007.

[RAMI08] C. Ramírez Landinez, C. Gómez Vargas, J. Arias Ruiz, H. López Salamanca, F. Róman Campos. “Modelamiento de protecciones utilizando ATP”. Grupo de investigación en compatibilidad electromagnética EMC-UN. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. Bogotá, Colombia. 2008. ISBN: 978-958-701-829-5

[REST08] Luis H. Restrepo, Gladys Caicedo, Ferley Castro. “*Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*”. *Revista Energía y Computación* Vol. 16 No. 1 Junio de 2008 p. 21 – 32.

[RODA10] Curso de planeamiento de sistemas de distribución. Capítulo 1: Modelamiento de transformadores. Ingeniero Darío Rodas. Profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira - Facultad de Ingenierías. Programa de maestría en ingeniería eléctrica. 2010.

[SEML75] A. Semlyen, A. Dabuleanu, “*Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94(2), p.p. 561 - 571, April 1975.

[SERN10] I. D. Serna, C. D. Ferreira, S. A. Martínez, M. F. Suárez, and G. Carrillo, “Impact of static load models on the power distribution fault location problem,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. IEEE/PES 2010. Page(s): 706 – 711.

[SIEM10] Siemens Energy, Inc. “Program Operation Manual PSS®E 32.0.5”. October 2010. Section: 5 – 10.

[SVOB98] T. P. Svobodny. *Mathematical Modeling for Industry and Engineering*, Prentice-Hall 534 pages. 1998.

[TAYL08] L.Y. Taylor, R.A. Jones, and S.M. Halpin, “Development of load models for fault induced delayed voltage recovery dynamic studies” in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-7.

[THUK06] D. Thukaram, U. Shenoy, H. Ashageetha. “Neural network approach for fault location in unbalanced distribution networks with limited measurements”. *Power India Conf., 2006 IEEE*. DOI:10.1109/POWERI.2006.1632510.

[VILLA06] Villa C. Ronald & Jaimes F. Félix. “*Caracterización de circuitos de distribución para estudios de calidad en sistemas de energía eléctrica*”. Trabajo de grado.

Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2006.

[WATS07] N. Watson and J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. IET Power and Energy Series 39. Published by Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. 2007. ISBN: 0 85296 106 5. Page(s): 68 – 73.

Anexos

Anexo A.1. Código fuente escrito en lenguaje *fortran* y que fue implementado en el *Models Type-94* en su versión Norton non-tranmission

```
MODEL CZIPL  -- NB! 6 character name limit

-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Norton non-TR model      |
| - these data and input values are provided to the model by ATP        |
| - these output values are used by ATP                                |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order        |
-----endcomment

DATA  n                -- number of phases
      ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side

INPUT v[1..n]          -- voltage(t) at each left node
      v0[1..n]         -- voltage(t=0) at each left node
      i0[1..n]         -- current(t=0) into each left node

VAR   i[1..n]          -- current(t) into each left node (for plotting)
      is[1..n]         -- Norton source(t+timestep) at each left node
      g[1..ng]         -- conductance(t+timestep) at each left node
                        -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
      flag             -- set to 1 whenever conductance value is modified

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model    |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment

-- End header.
CONST  freq  {val: 60}

DATA   Snom          -- Potencia nominal en VA
      FP             -- Factor de potencia de la carga
      Vnom           -- Voltaje nominal del sistema
      Vopi {dflt: -1} -- Voltaje de operacion inicial
      Vbreak {dflt: 0.6} -- Voltaje en p.u de ruptura

comment -----
-
| Vpu_break, es el voltaje en [p.u] de ruptura, es el valor limite para
|
| el cual el modelo ZIP/EXP se comporta estable modelado como Scte, Icte
|
| o Hibrido. Debajo de este valor (Vpu_break), el modelo se comporta
como|
```

```
| Zcte.
|
-----
endcomment
    bp      {dflt: 2} -- Para bp ~= 1, ap0 = ap2 = 0
    bq      {dflt: 2} -- Para bq ~= 1, aq0 = aq2 = 0

    ap0     {dflt: 0}
    ap1     {dflt: 1}
    ap2     {dflt: 0}
    aq0     {dflt: 0}
    aq1     {dflt: 1}
    aq2     {dflt: 0}

    pr      {dflt: 1} -- Para variacion de la potencia activa
    px      {dflt: 1} -- Para variacion de potencia reactiva
    Nodo     {dflt: 1} --Para indicar el numero del nodo
    Fase     {dflt: 0} --Para indicar la fase 1=> Para fase A; 2=> Para
fase B; 3=> Para fase C
    Vista    {dflt: 0}  --Para habilitar escritura en Reduccion 1=>
Habilita; 0=> Deshabilita

VAR      ap[1..3]
        aq[1..3]
        bpn  -- para trabajar bp como variable
        bqnt -- para trabajar bq como variable

        vrms
        Vcal

        Pnom
        Qnom
        P
        Q
        G
        B
        Ymag
        Yang
        Zmag
        Zang
        R
        X
        L
        Ram  -- Resistencia de amortiguamiento, se usa para evitar las
oscilaciones debidas a la regla trapezoidal.

-- Para control del modelo de la carga
    bpant
    bqant

    ap0ant
    ap1ant
    ap2ant
    aq0ant
    aq1ant
    aq2ant
```

```
control
-----
st
k
g
g_1  -- añadida para usar con Ram

INIT

st := 2/timestep

ap[1..3] := [ap0,ap1,ap2]
aq[1..3] := [aq0,aq1,aq2]
bpn := bp
bqn := bq

-- Inicio control bp y bq

IF bp <> 1 THEN
    ap[1] := 0
    ap[2] := 1
    ap[3] := 0
ENDIF

IF bq <> 1 THEN
    aq[1] := 0
    aq[2] := 1
    aq[3] := 0
ENDIF

-- Fin control
control:=0

ENDINIT

-----
-- SUBMODELO: CALCULO VALOR RMS
-----
MODEL rms_meter
DATA  freq      -- base frequency
      xrms_ini {dflt:-1} -- initial rms value
INPUT x         -- monitored signal
VAR   xrms      -- rms value of monitored signal
      x2        -- internal, x*x
      ix2       -- internal, integral of x2
      period    -- 1/freq
OUTPUT xrms
DELAY CELLS(ix2): 1/freq/timestep +1
INIT
    period      := recip(freq)
    histdef(ix2) := 0
    integral(x2) := 0
    IF xrms_ini < 0 THEN xrms:=0 ELSE xrms:=xrms_ini ENDIF
ENDINIT
EXEC
    x2 := x*x
```



```
ix2 := integral(x2)
IF t>period THEN
  xrms := sqrt((ix2 - delay(ix2, period))/period)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
-----
-- FIN SUBMODELO
-----

EXEC

-----
-- Usando el submodelo
USE rms_meter AS rms_meter_v
  DATA  freq      := freq
        xrms_ini  := Vopi
  INPUT  x          := v
  OUTPUT vrms      := xrms
ENDUSE

-----

Vcal := vrms/Vnom      -- Este es el voltaje en pu
-- write(Vcal)

-----
-- CONTROL DEL MODELO DE LA CARGA PARA PERTURBACIONES DE V
-----
  IF Vcal <= Vbreak AND (bpn <> 2 OR bqn <> 2) THEN
    -- Guardo el modelo anterior
      bpant:=bpn
      bqant:=bqn

      ap0ant:=ap[1]
      ap1ant:=ap[2]
      ap2ant:=ap[3]

      aq0ant:=aq[1]
      aq1ant:=aq[2]
      aq2ant:=aq[3]
    -- Ahora cambio al nuevo modelo (Modelo Zcte)
      bpn := 2
      bqn := 2

      ap[1] := 0
      ap[2] := 1
      ap[3] := 0

      aq[1] := 0
      aq[2] := 1
      aq[3] := 0
      control := 1      -- Indica cambio de modelo
    ENDIF

-- Si se acaba la perturbacion de voltaje entonces
```

```
IF Vcal >= Vbreak AND control = 1 THEN
-- Regreso al modelo anterior
    bpn := bpant
    bqn := bqant

    ap[1] := ap0ant
    ap[2] := ap1ant
    ap[3] := ap2ant

    aq[1] := aq0ant
    aq[2] := aq1ant
    aq[3] := aq2ant
    control := 0      -- Vuelve al modelo anterior
ENDIF

-- -----
-- FIN DEL CONTROL
-- -----

-- Calculando las nuevas impedancias

Pnom := Snom*FP
Qnom := -Snom*sin(acos(FP))

P := Pnom*(ap[1]+ap[2]*(Vcal**bpn)+ap[3]*(Vcal**2))
Q := Qnom*(aq[1]+aq[2]*(Vcal**bqn)+aq[3]*(Vcal**2))

G := P/(vrms**2)
B := Q/(vrms**2)

Ymag := norm(G,B)
Yang := atan2(B,G)

Zmag := 1/Ymag
Zang := -Yang

R := Zmag*cos(Zang)/pr
X := Zmag*sin(Zang)/px
L := X/(120*pi)
Ram := L/timestep

-- -----
-- Escritura de elementos necesarios para la reduccion

IF Vista=1 THEN
    IF Fase=1 THEN
        write('CargaModel')
        write('N'Node'A')
        write(R)
        write(X)
    ENDIF
    IF Fase=2 THEN
        write('CargaModel')
        write('N'Node'B')
        write(R)
        write(X)
    ENDIF
ENDIF
```

```
ENDIF
IF Fase=3 THEN
    write('CargaModel')
    write('N'Nodo'C')
    write(R)
    write(X)
ENDIF
ENDIF

-- -----
-- Cálculo de las variables de salida

g    := (1/Ram + 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con V(t)
g_1  := (1/Ram - 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con v(t-timestep)
k    := (1+R*((1/Ram - 1/(st*L))))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- Para i(t-
timestep)
--write(g)
--write(k)
--write(g_1)
IF t=0 THEN
    flag := 1
    i    := i0          -- t=0 current through L
    is   := -k*i0 + g_1*v0 -- history term for next step
ELSE
    flag := 1
    i    := g*v - is     -- applying trapezoidal rule, calculate from
v(t)
    is   := -k*i + g_1*v -- history term from trapezoidal rule, for
next step
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Anexo A.2. Análisis de los efectos de la inyección de falla en la estabilidad de los modelos de la carga en el ATP/EMTP

1. Introducción

Este trabajo propone un análisis considerando diferentes modelos de carga, y analizando la estabilidad de las señales de tensión y corriente, cuando se realiza la inyección de la falla en diferentes puntos de la señal, tanto de tensión como de corriente. A su vez, este análisis permite la validación del modelo de la carga desarrollado. El análisis fue realizado cuando se simula falla trifásica en el sistema de distribución.

Como contenido, en la sección dos se presenta la metodología propuesta para realizar el análisis. La tercera sección está dedicada a presentar la prueba y el análisis de los resultados. Y por último, en la cuarta sección se destacan las conclusiones de esta investigación.

2. Metodología propuesta

La metodología propuesta esta enfoca a realizar la validación del modelo de la carga desarrollado a partir de la herramienta de *Models* del ATP en un circuito real para diferentes modelos de carga propuestos, (Z_{cte} , I_{cte} , S_{cte} y $0.8I_{cte}$ más $0.2Z_{cte}$ [AGUE06]) incluyendo el caso base (impedancia constante modelado con elementos que posee el ATP) y analizar la estabilidad de las señales de tensión y corriente en el centro de generación.

Así, la validación se realizará analizando la influencia de la falla tanto en las señales de tensión (V) como de corriente (I) con diferentes modelos de la carga, para verificar que no se produzcan oscilaciones debidas al modelo de la carga. La inyección de la falla en el tiempo se realizará observando el ciclo de tensión y corriente, colocando la falla en donde los valores de la señal en el tiempo son cero, intermedio positivo, máximo positivo, intermedio negativo y máximo negativo respectivamente. Se analizará el tipo de falla trifásica (fases A-B-C), con una resistencia de falla intermedia de 16Ω y en un punto intermedio del circuito a 17.098 km en el nodo 175.

La tabla A.2.1 muestra los tiempos de inyección de la falla calculados para cada caso, dependiendo de la señal (Tensión o corriente) y el tipo de fase.

A. Sistema de prueba

El sistema de prueba seleccionado, parte de un sistema real de una empresa de distribución de energía que trabaja con el grupo de investigación. Este circuito es un circuito trifásico

que cuenta con un total de siete cargas distribuidas a lo largo del circuito, y tiene una longitud de aproximadamente 30 km.

La figura A.2.1 muestra un diagrama del sistema de prueba modelado en el ATP/EMTP, con las cargas modeladas por medio de la herramienta de *Models* del ATP.

Caso específico		Tiempo de inyección de la falla [s]		
Señal de Tensión	Valor de la señal	Fase A	Fase B	Fase C
	Cero	0,062500	0,068056	0,073611
	Intermedio positivo	0,069444	0,075000	0,080556
	Máximo positivo	0,066667	0,072222	0,077778
	Intermedio negativo	0,061111	0,066667	0,072222
	Máximo negativo	0,075000	0,063889	0,069444
Señal de Corriente	Valor de la señal	Fase A	Fase B	Fase C
	Cero	0,063624	0,069166	0,074724
	Intermedio positivo	0,070568	0,076110	0,081668
	Máximo positivo	0,067791	0,073332	0,078890
	Intermedio negativo	0,062235	0,067777	0,073335
	Máximo negativo	0,076124	0,064999	0,070557

Tabla A.2.1. Tiempo de inyección de la falla dependiendo del valor de la señal

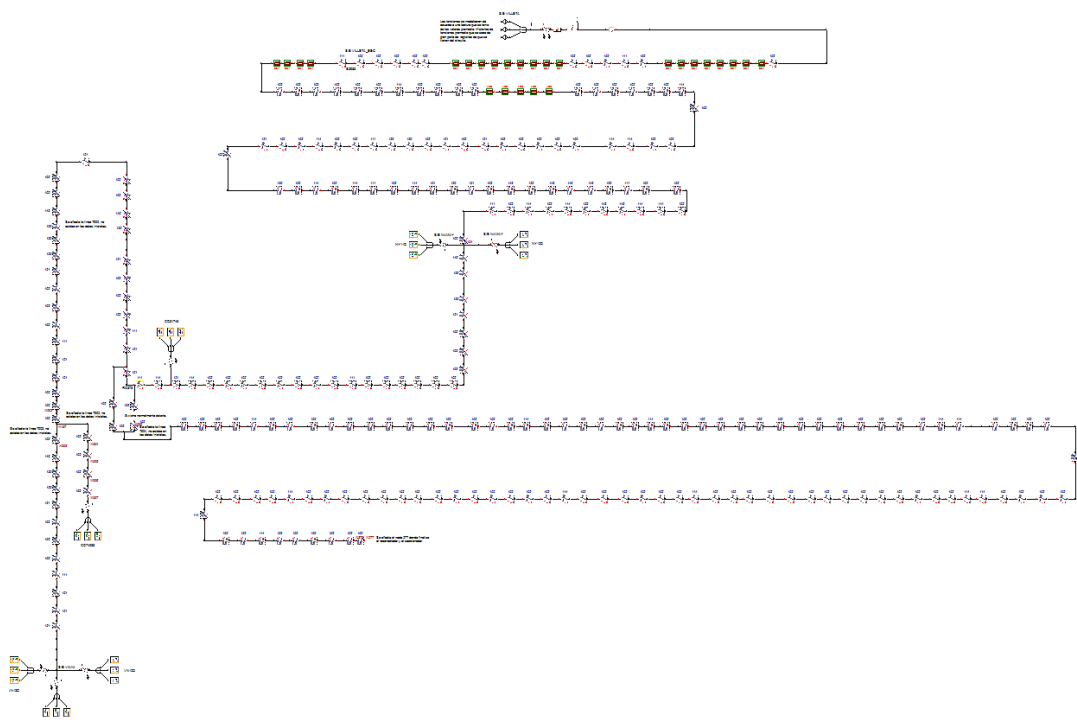


Figura A.2.1. Sistema de prueba modelado en el ATP/EMTP, con las cargas modeladas por medio de la herramienta de *Models* del ATP.

Finalmente, el esquema que se tuvo en cuenta para modelar el tipo de falla fue el siguiente:

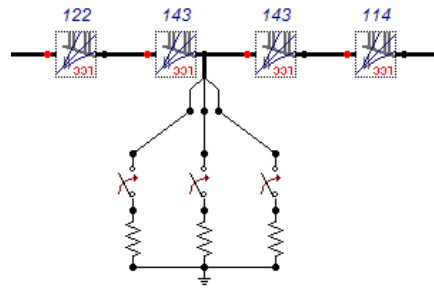


Figura A.2.2. Esquema de simulación para falla trifásica (fases A-B-C)

El paso del tiempo de simulación que se tomó para todas las simulaciones fue ($\Delta t = 0.0005s$).

3. Resultados y análisis

En número de gráficos obtenidos al realizar el análisis fue de 300. En este anexo se muestran todos los resultados obtenidos.

A. Análisis de la influencia de la falla con la señal de tensión (V).

a. Incepción de la falla teniendo en cuenta la señal de tensión (V) en valor cero.

- Para la fase A: ($T_{falla} = 62.5 \text{ ms}$)

- Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).

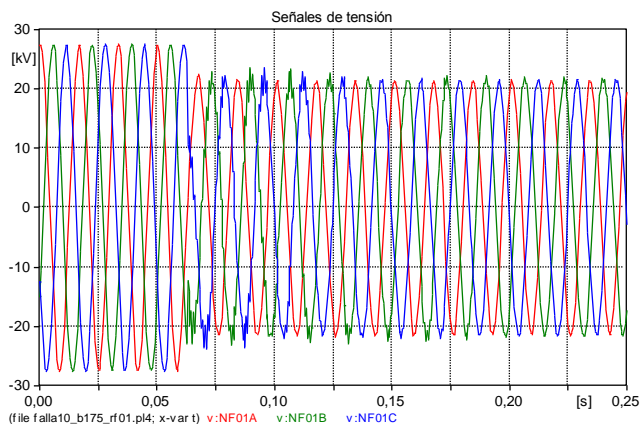


Figura A.2.3. Señales de Tensión con incepción de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase A.

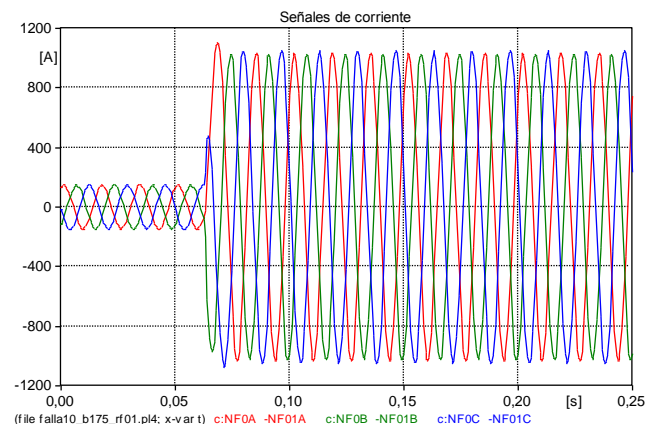


Figura A.2.4. Señales de corriente con incepción de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase A.

- Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.

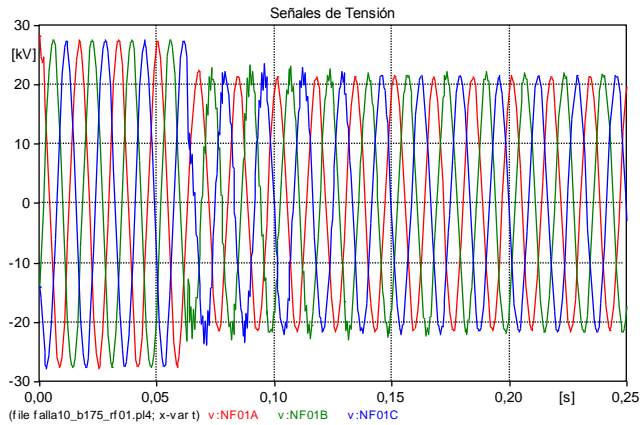


Figura A.2.5. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

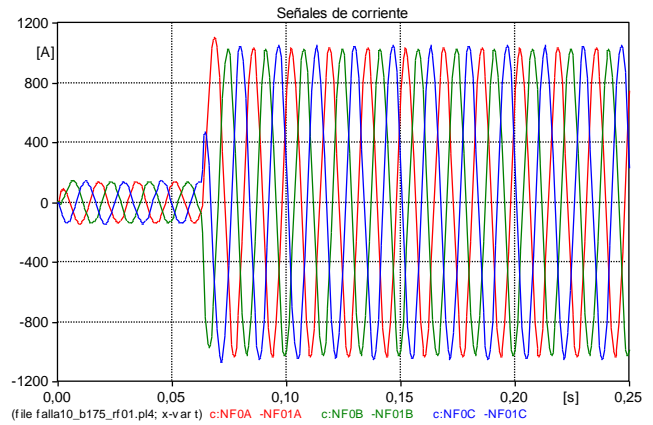


Figura A.2.6. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

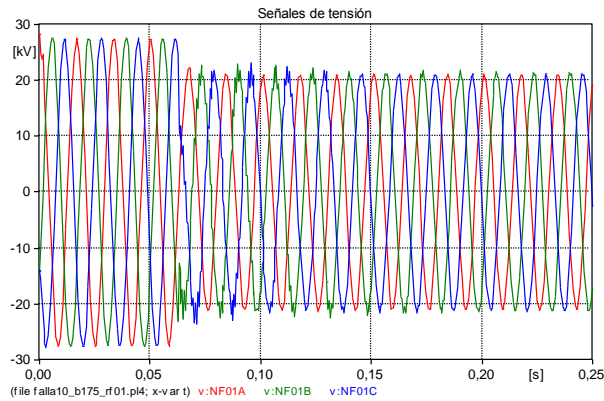


Figura A.2.7. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

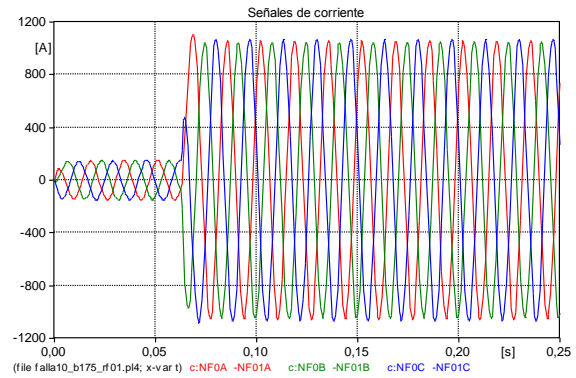


Figura A.2.8. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

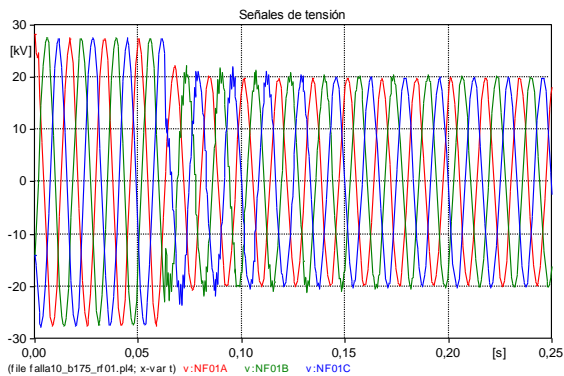


Figura A.2.9. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

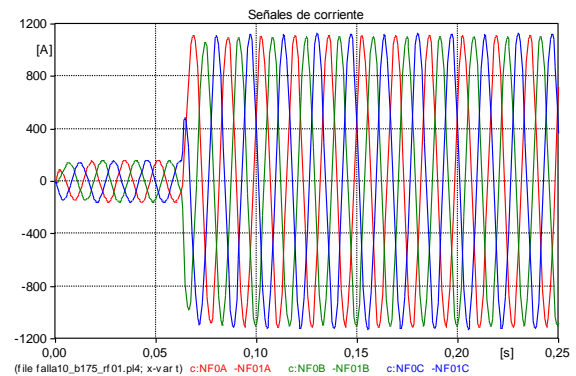


Figura A.2.10. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seael (V) en valor cero en la fase A.

- Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).

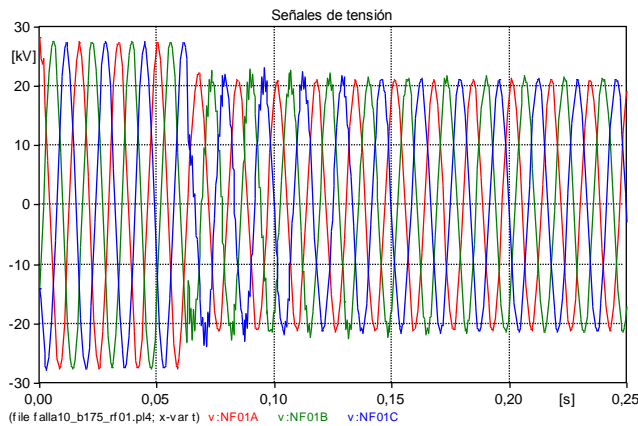


Figura A.2.11. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase A.

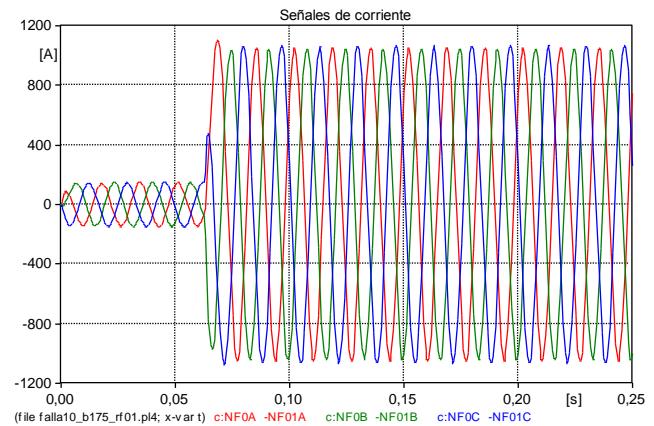


Figura A.2.12. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase A.

Conclusiones: Se nota que las seales obtenidas al simular el circuito con los modelos de la carga, modelados a través de la herramienta de *Models* del ATP, presentan el mismo comportamiento que el obtenido al simular el circuito con los elementos propios del ATP como impedancia constante.

La señal de tensión de la fase A, después de ocurrida la falla, no presenta mayor distorsión, mientras que las otras dos fases (B y C) se presenta una pequeña oscilación, esto se debe a que la inyección de la falla se simulo en el instante en que la tensión de la fase A era igual a cero.

Las seales de corriente de las fases se comportan de forma estable y después de ocurrida la falla la señal de corriente de la fase A presenta un pico un poco mayor que luego se estabiliza con el de las otras corrientes.

- Para la fase B: ($T_{falla} = 68.056$ ms)

- Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).

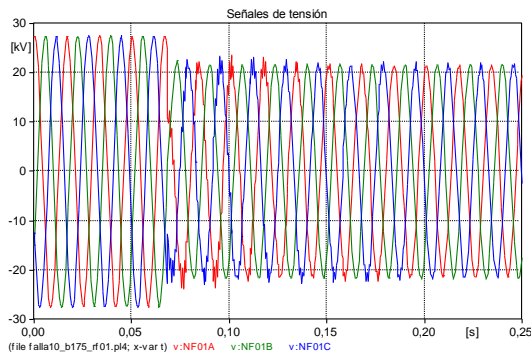


Figura A.2.13. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

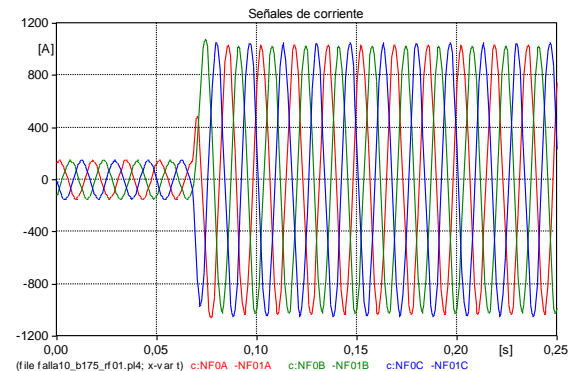


Figura A.2.14. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

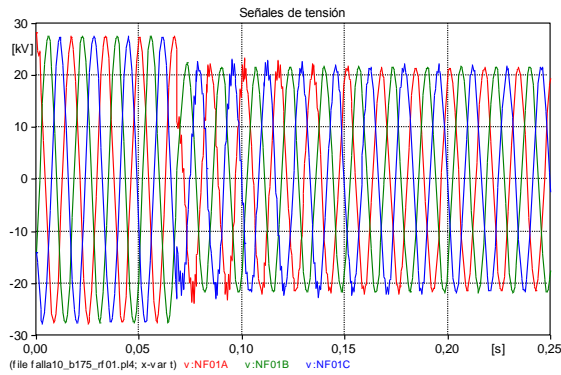


Figura A.2.15. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

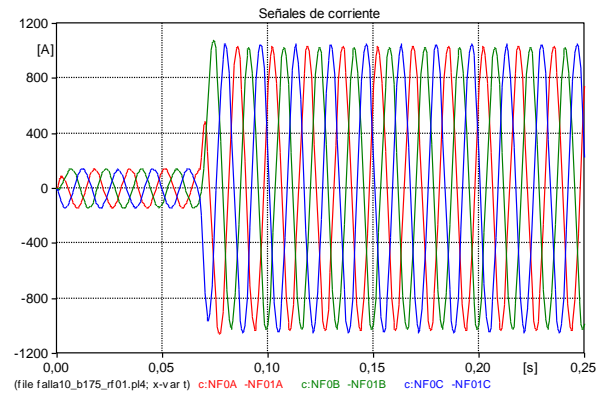


Figura A.2.16. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

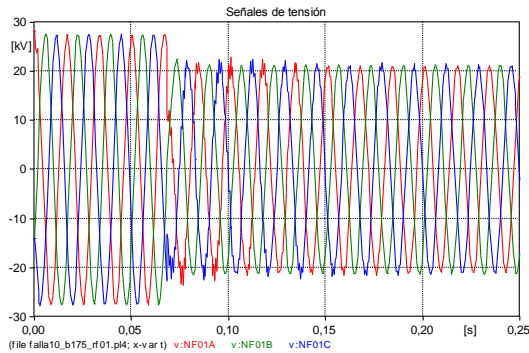


Figura A.2.17. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

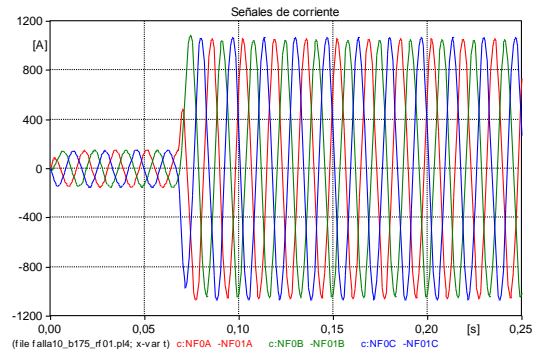


Figura A.2.18. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

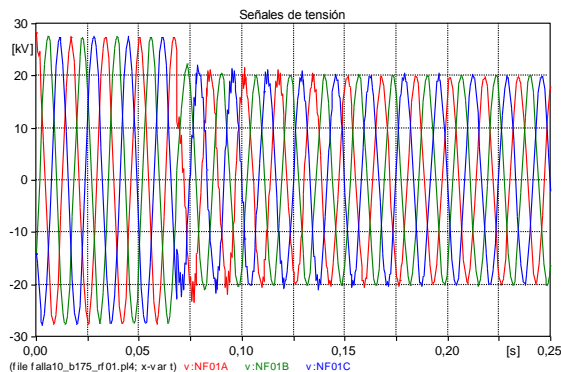


Figura A.2.19. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

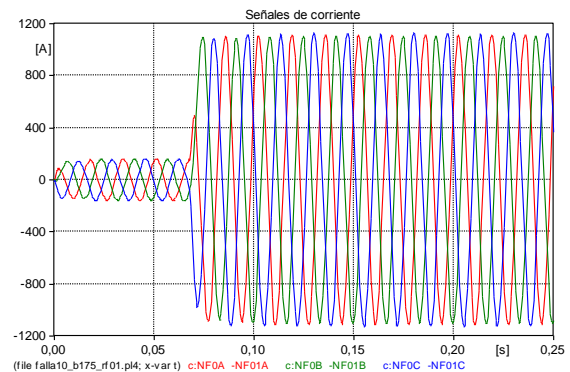


Figura A.2.20. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

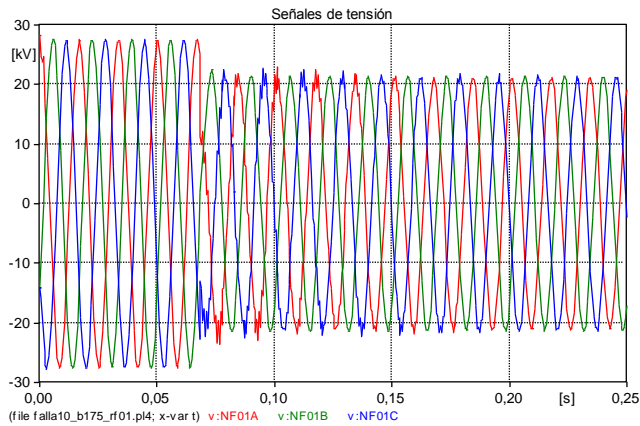


Figura A.2.21. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

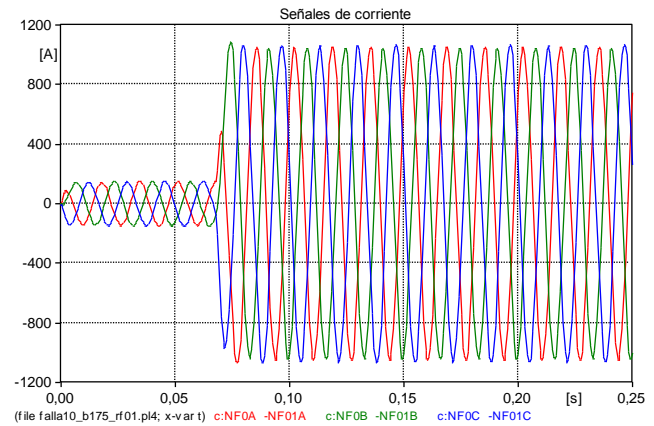


Figura A.2.22. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase B.

Conclusiones: Al igual que para el caso anterior, las señales presentan el mismo comportamiento en todos los modelos de la carga simulados, tanto con *Models*, como con los elementos del ATP.

Se nota una distorsión en los voltajes de las fases A y C, mientras que en la fase B, que fue donde se tuvo en cuenta el valor cero de la señal, no se presenta distorsión, lo anterior se da después de ocurrida la falla. En pre-falla las señales de tensión presentan el mismo comportamiento.

Las señales de corriente se comportan de forma estable, en pre-falla y en falla.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 73.611$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

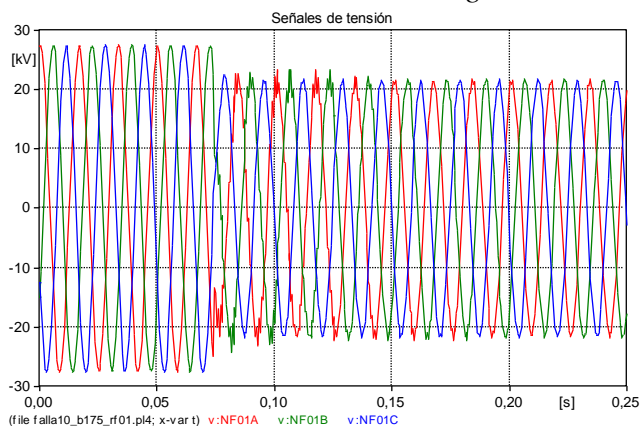


Figura A.2.23. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase C.

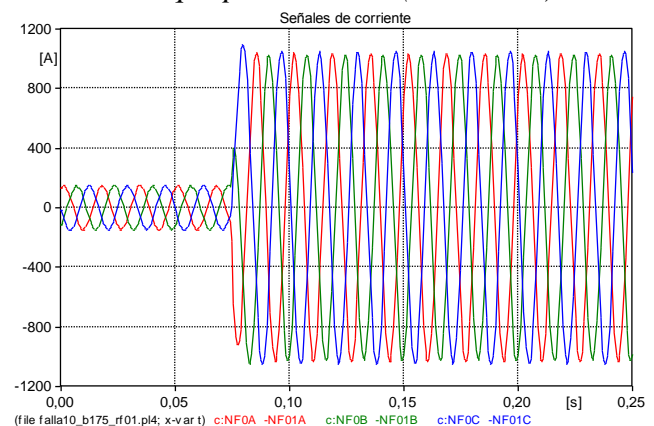


Figura A.2.24. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

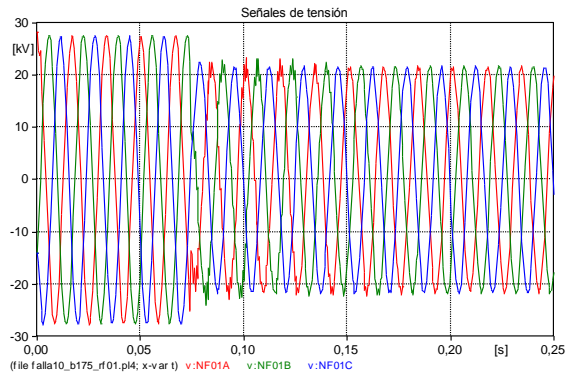


Figura A.2.25. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

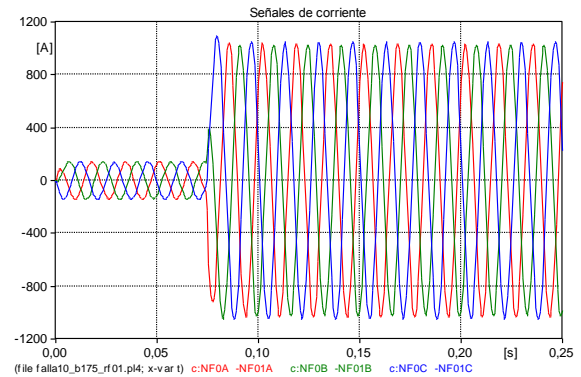


Figura A.2.26. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

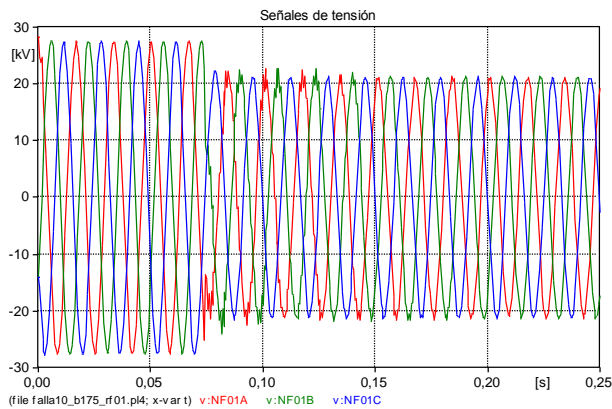


Figura A.2.27. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

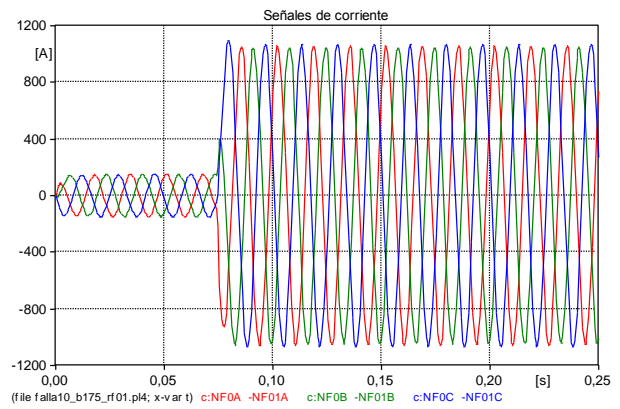


Figura A.2.28. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

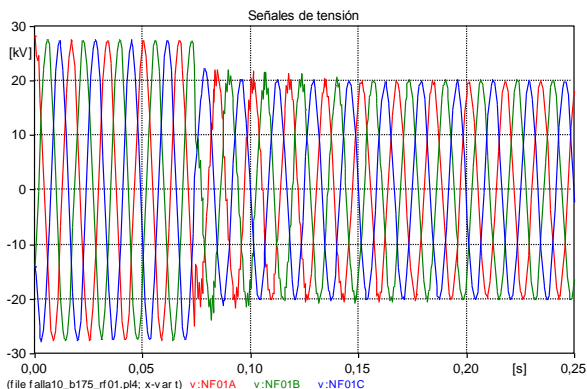


Figura A.2.29. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

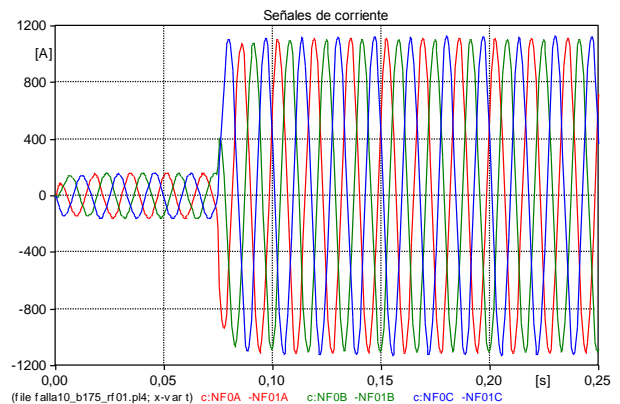


Figura A.2.30. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor cero en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

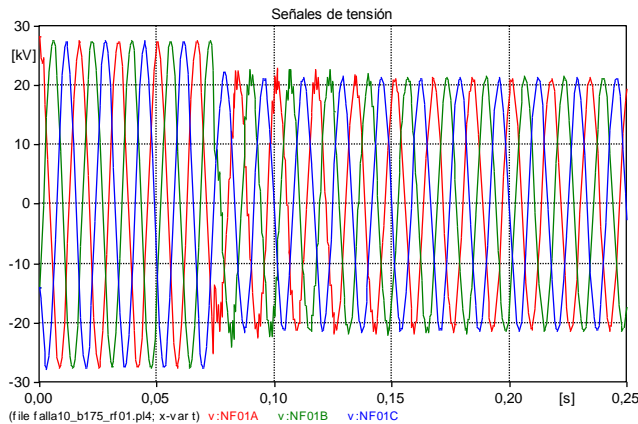


Figura A.2.31. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase C.

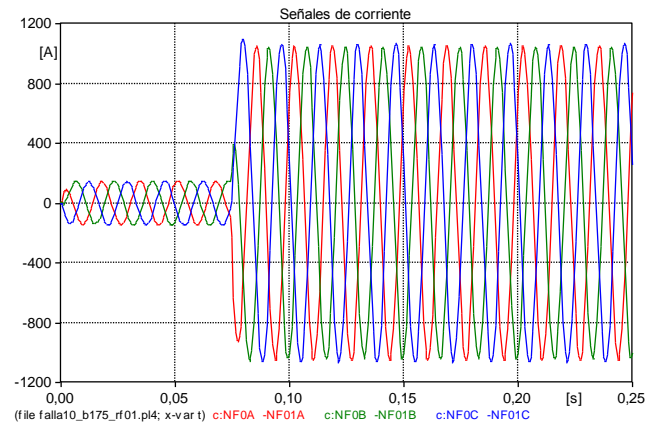


Figura A.2.32. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor cero en la fase C.

Conclusiones: Al comparar las graficas de las señales de tensión (V) y corriente (I) del caso base con los modelos de la carga modelados con la herramienta de *Models* del ATP, se observa el mismo comportamiento en todos los casos, en las señales en pre-falla y falla.

En post- falla, se nota distorsión de las señales de tensión (V) de las fases A y B, mientras que en la fase C no hay distorsión, esto se debe a que la inyección de la falla se realiza cuando la señal de tensión en la fase C es cero.

Los valores de corriente en pre-falla y falla presentan un comportamiento estable.

b. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de tensión (V) en valor intermedio positivo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 69.444$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

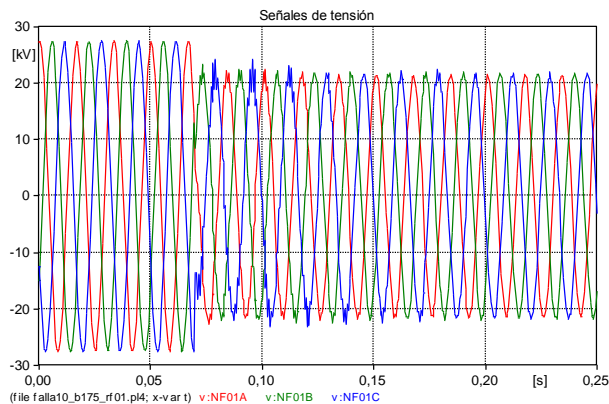


Figura A.2.33. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

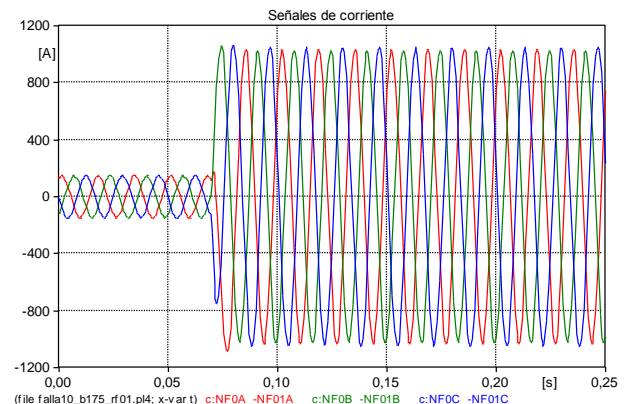


Figura A.2.34. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

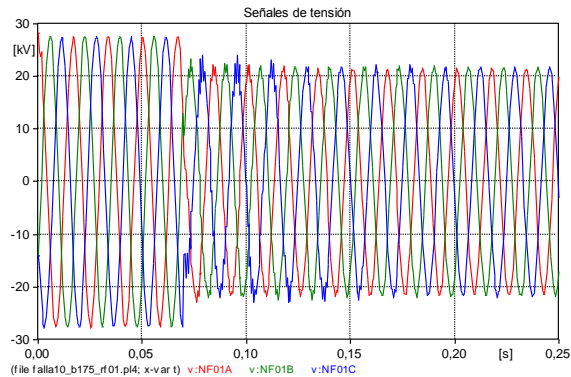


Figura A.2.35. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

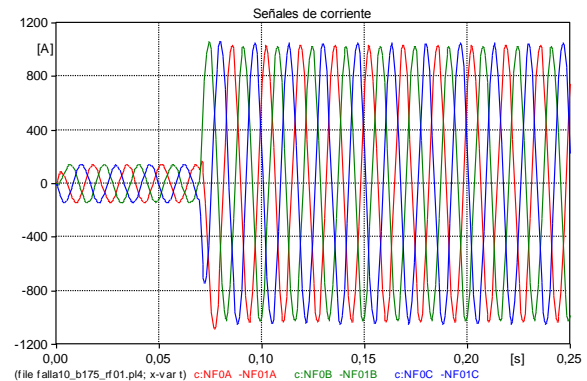


Figura A.2.36. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

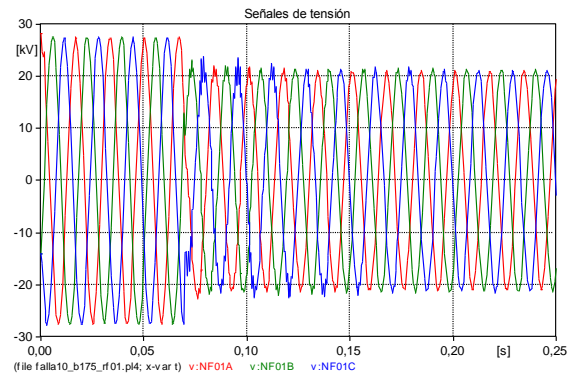


Figura A.2.37. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

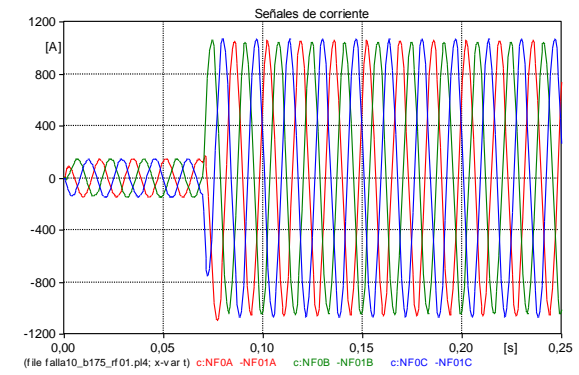


Figura A.2.38. Seales de I con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

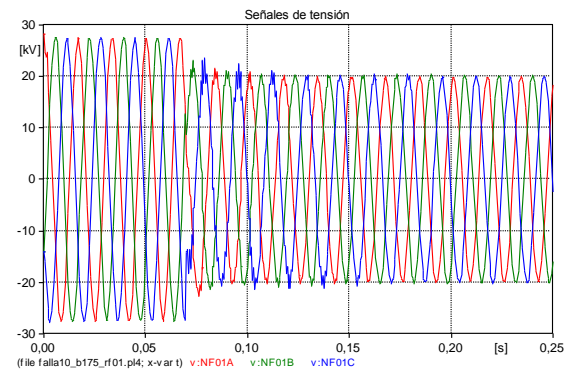


Figura A.2.39. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

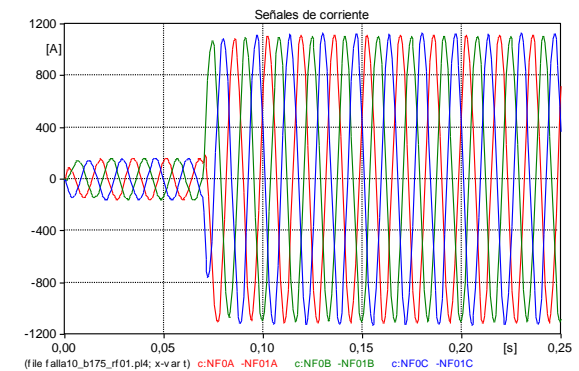


Figura A.2.40. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

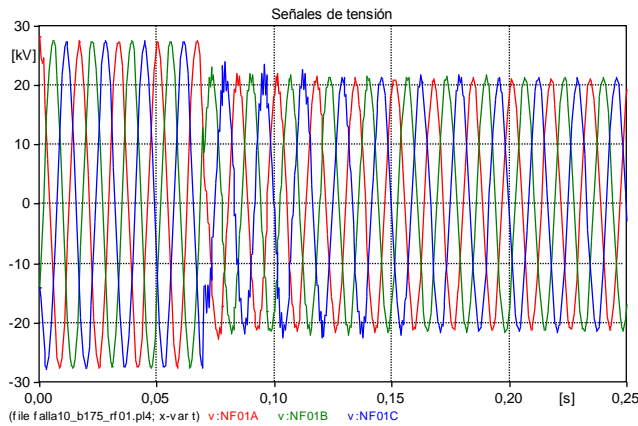


Figura A.2.41. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

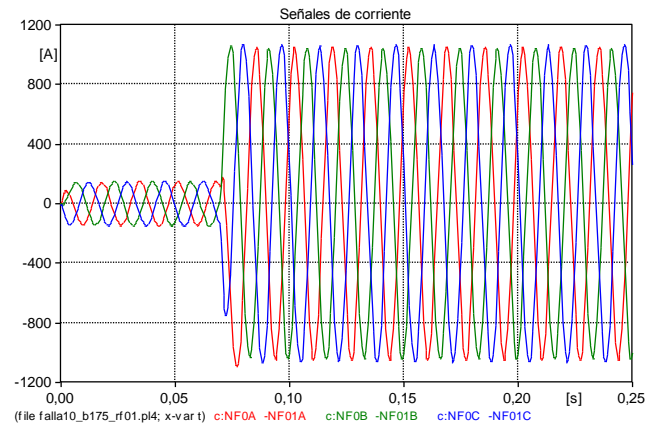


Figura A.2.42. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase A.

Conclusiones: El comportamiento de las señales de tensión y corriente del caso base de impedancia constante y de los modelos de la carga tenidos en cuenta son los mismos.

Los valores de pre-falla de las señales de tensión son estables y no se presenta oscilaciones.

En estado de falla, las señales de tensión presentan inicialmente una distorsión que es común en todos los modelos de carga incluyendo el caso base y luego se estabilizan.

Las señales de corriente son estables en estado de pre-falla y de falla, sin presentar distorsiones.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 75$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

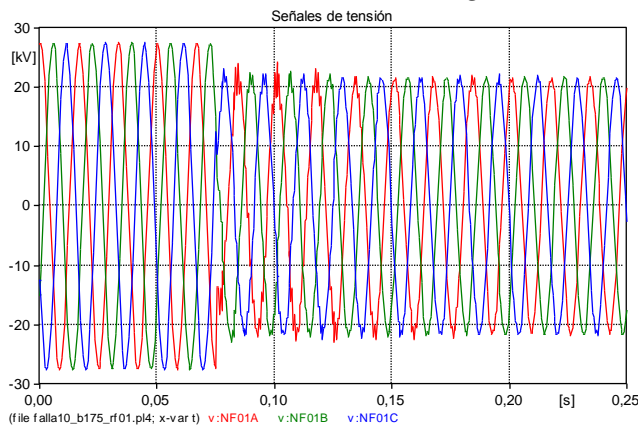


Figura A.2.43. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

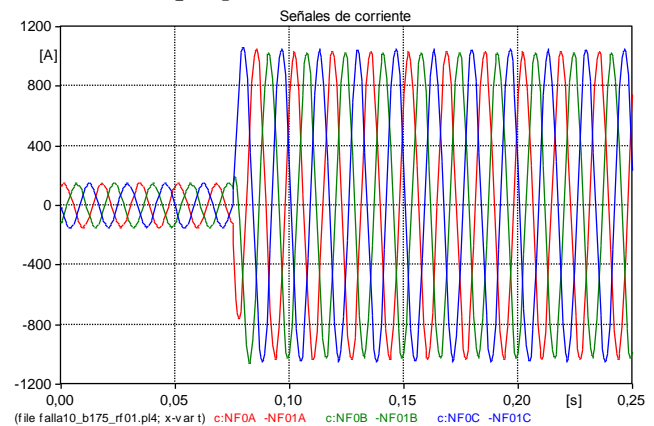


Figura A.2.44. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

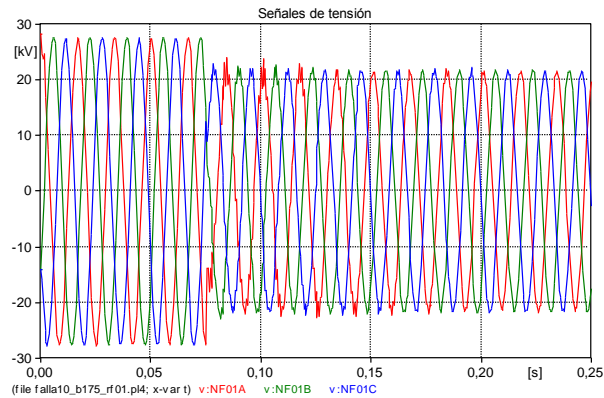


Figura A.2.45. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

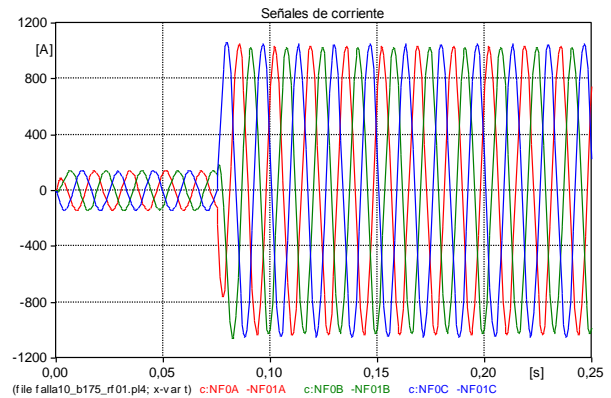


Figura A.2.46. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

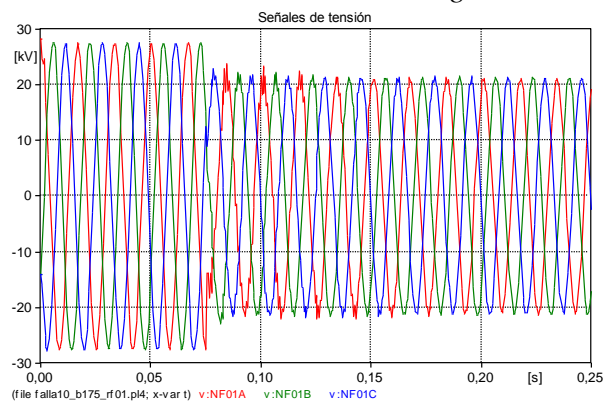


Figura A.2.47. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

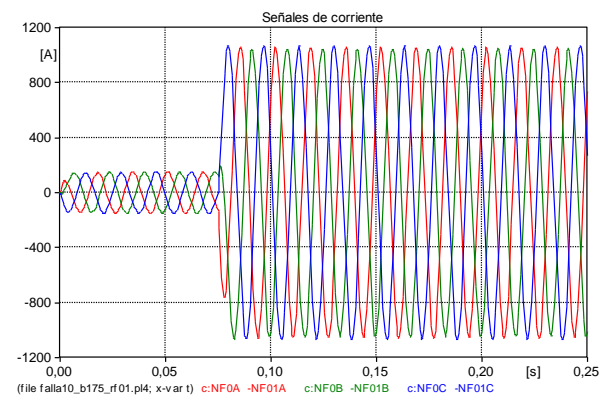


Figura A.2.48. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

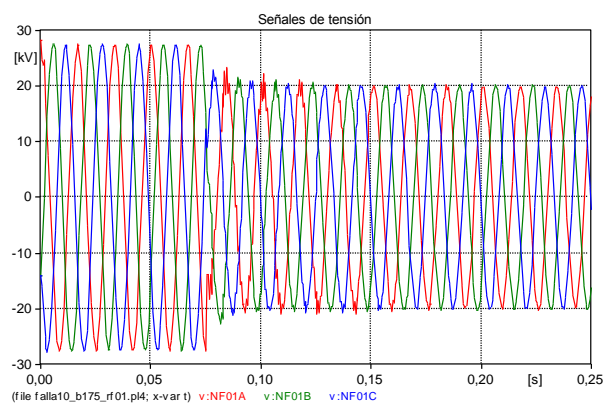


Figura A.2.49. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

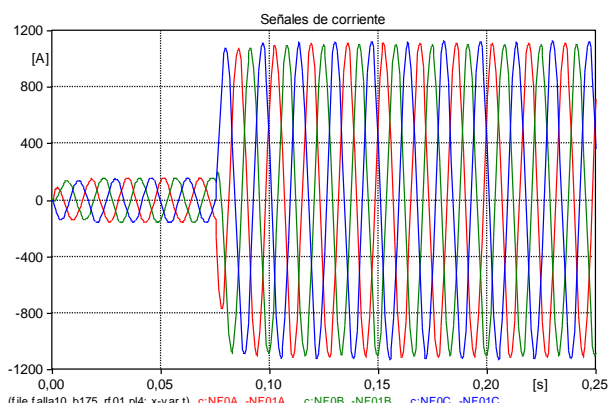


Figura A.2.50. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

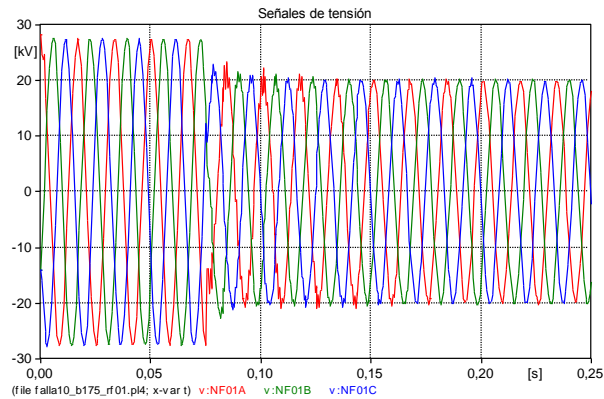


Figura A.2.51. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

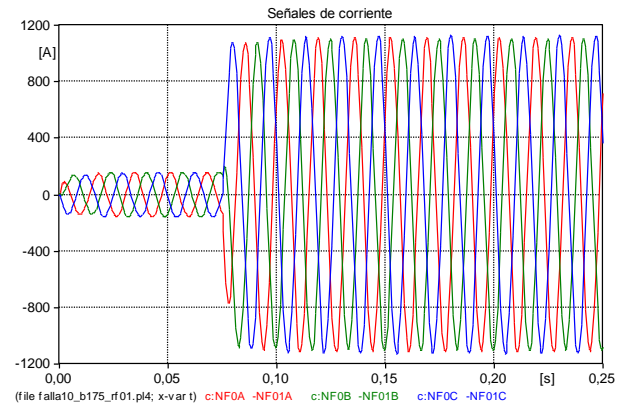


Figura A.2.52. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase B.

Conclusiones: Las señales de tensión y corriente presentan el mismo comportamiento en los modelos de la carga programados que en el caso base.

Se nota estabilidad en las señales de voltaje en estado de pre-falla y falla, aunque inicialmente, después de la inyección de la falla se presenta una distorsión en el voltaje que luego se estabiliza, esta distorsión se presenta en todos los casos.

Las señales de corriente permanecen estables en estado de pre-falla y aumentan en estado de falla y se estabilizan rápidamente en un valor; además no presentan distorsión.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 80.5555$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

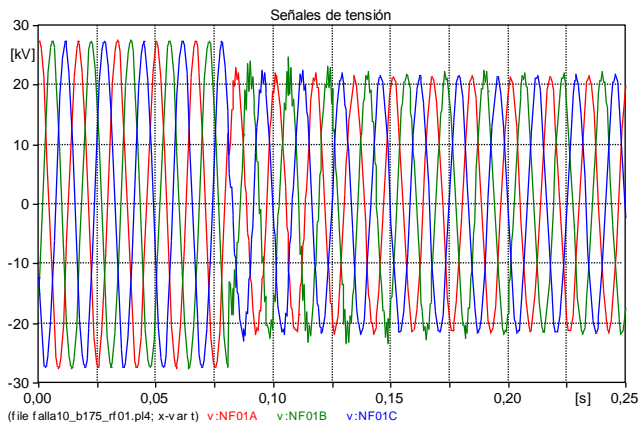


Figura A.2.53. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

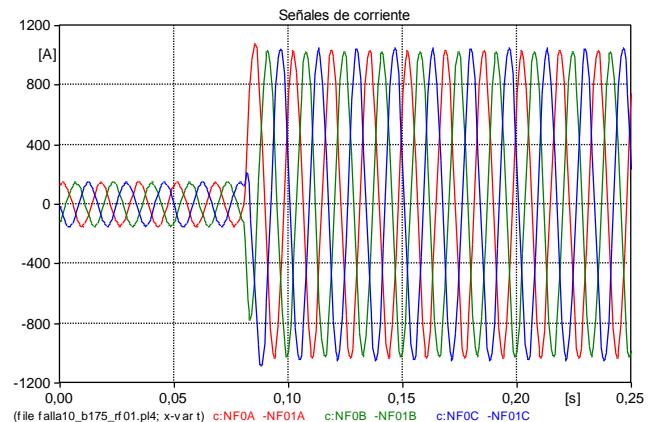


Figura A.2.54. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

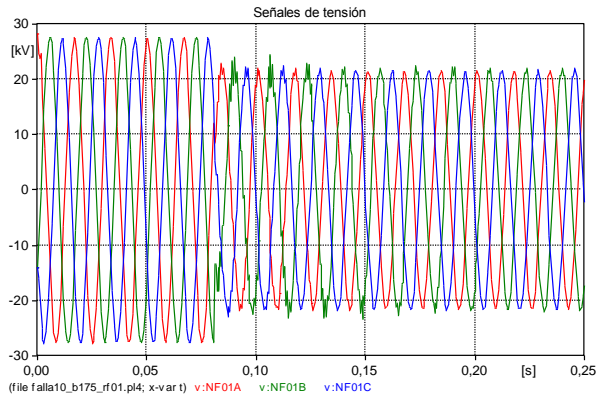


Figura A.2.55. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

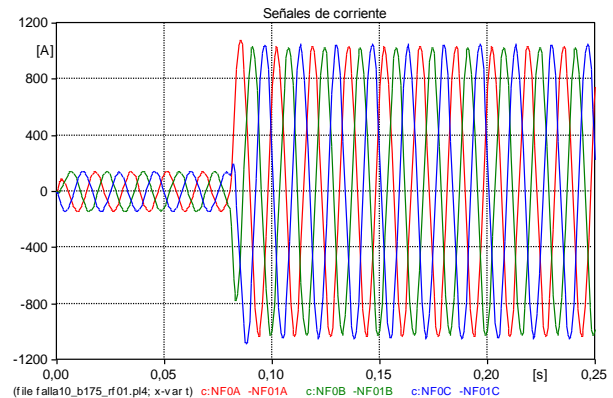


Figura A.2.56. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

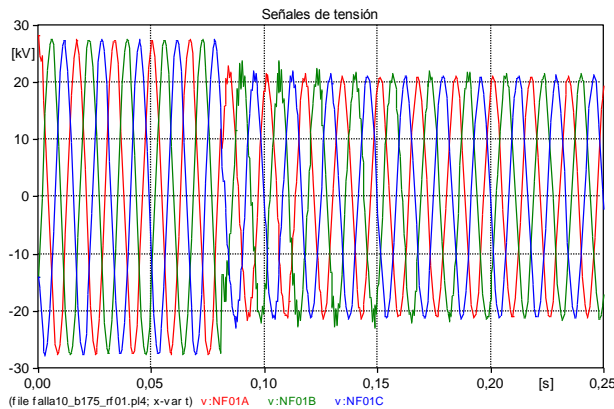


Figura A.2.57. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

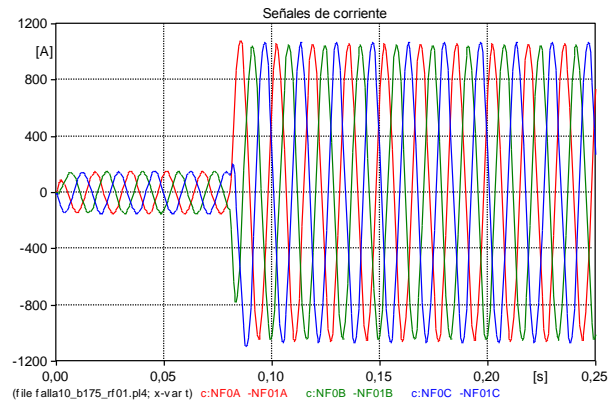


Figura A.2.58. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

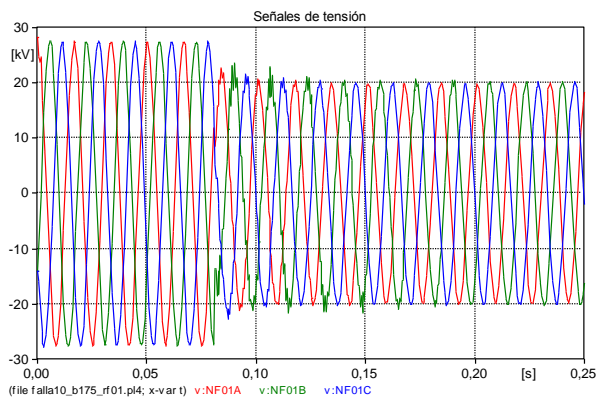


Figura A.2.59. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

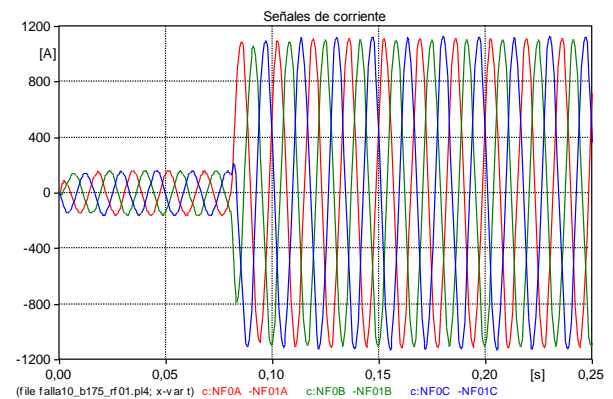


Figura A.2.60. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

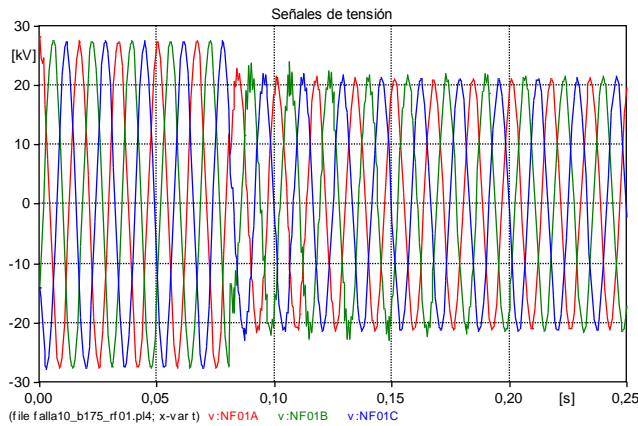


Figura A.2.61. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

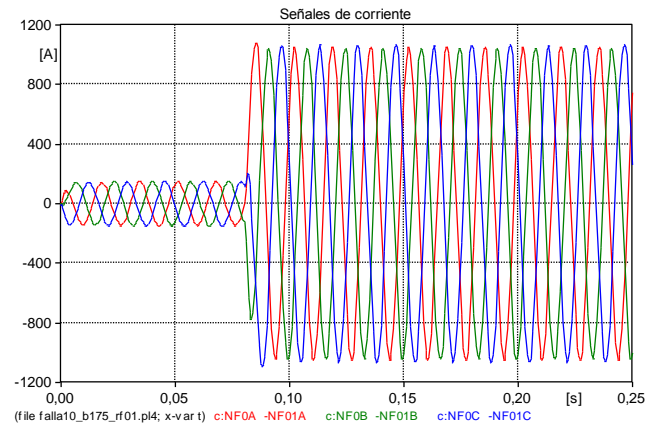


Figura A.2.62. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio positivo en la fase C.

Conclusiones: Se observa el mismo comportamiento en las señales de tensión y corriente en todos los casos.

Se presenta una distorsión en la señal de tensión, después de la inyección de la falla, que luego se estabiliza.

En estado de pre-falla y de falla las señales de tensión y corriente son estables.

c. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de tensión (V) en valor máximo positivo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 66.667$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

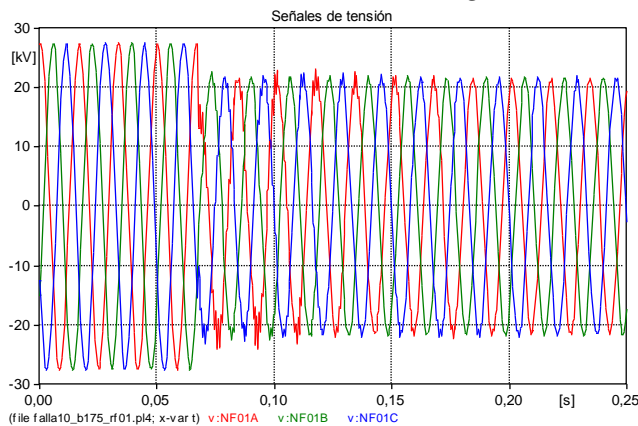


Figura A.2.63. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase A.

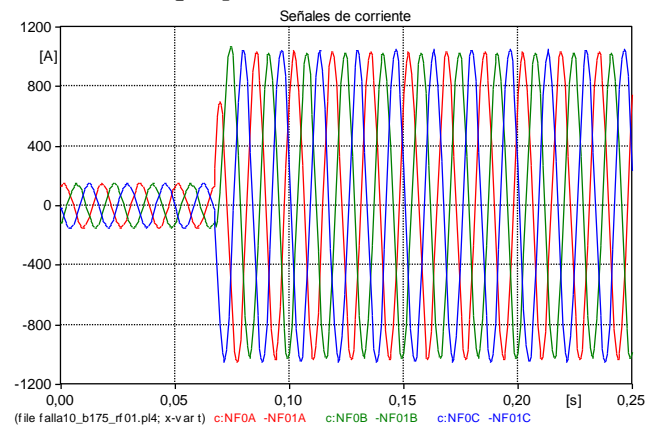


Figura A.2.64. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

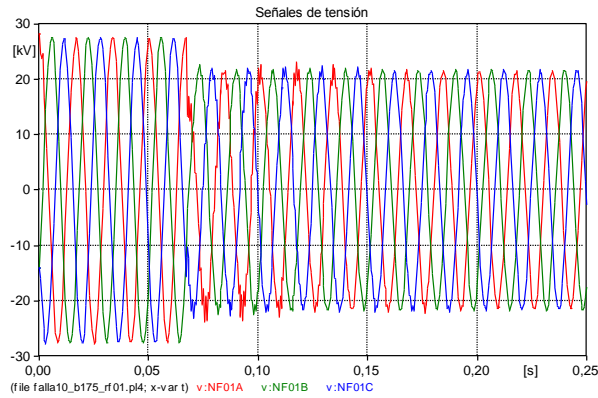


Figura A.2.65. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

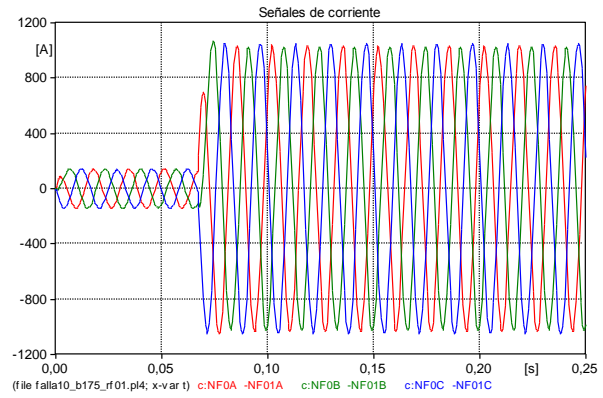


Figura A.2.66. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

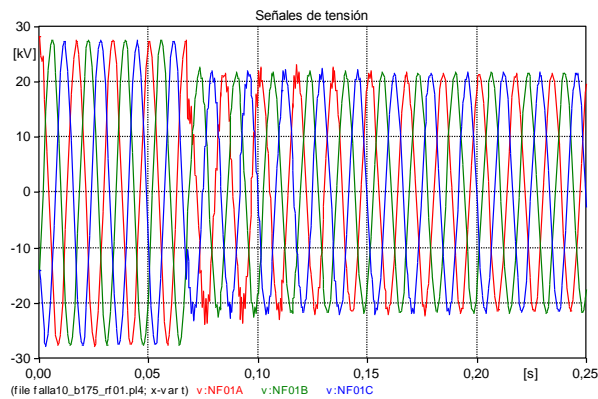


Figura A.2.67. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

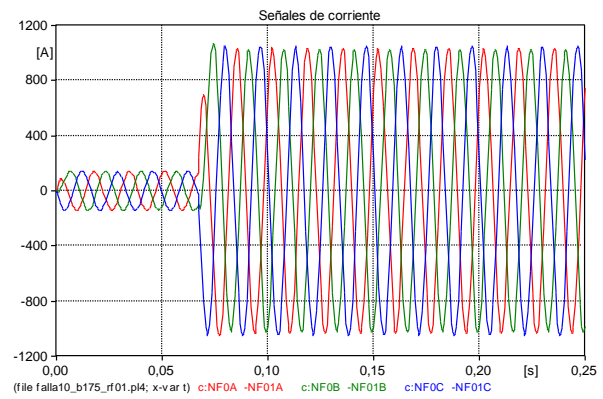


Figura A.2.68. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

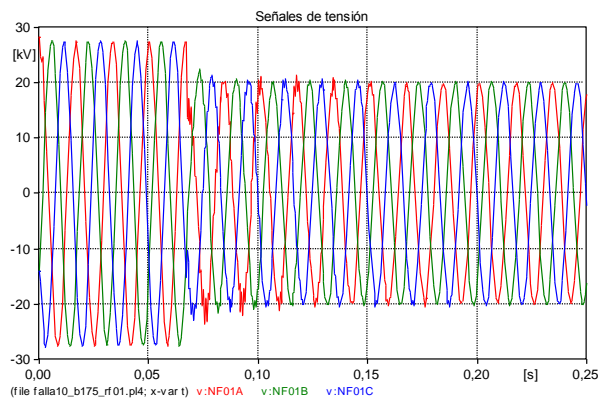


Figura A.2.69. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

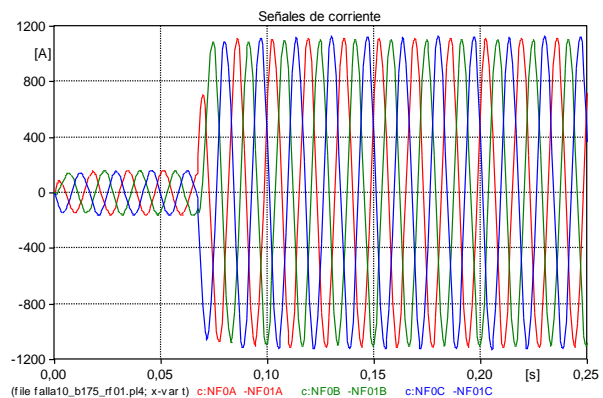


Figura A.2.70. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

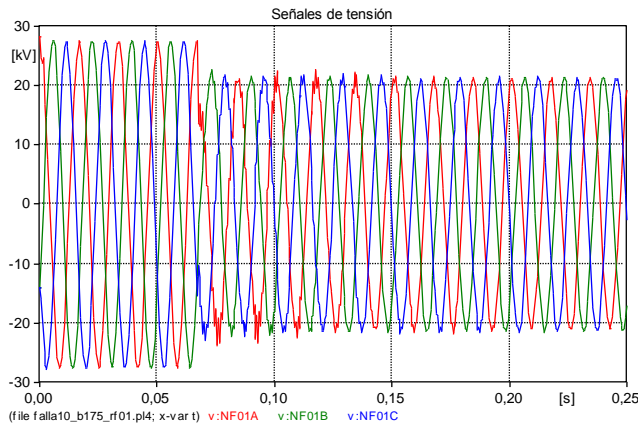


Figura A.2.71. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase A.

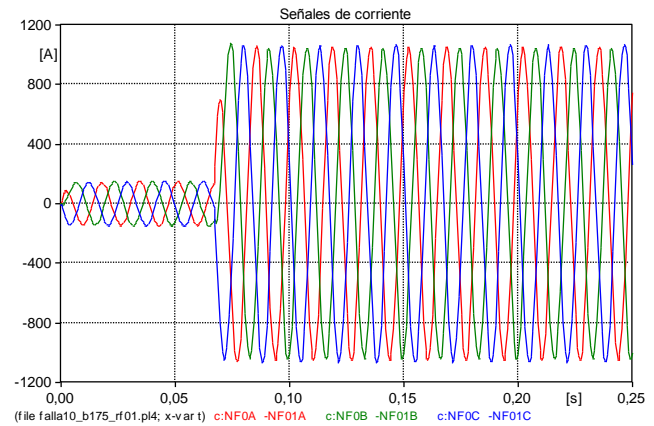


Figura A.2.72. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase A.

Conclusiones: Se presenta el mismo comportamiento para las señales de tensión y corriente en todos los casos.

Se observan distorsiones en las señales de tensión al inicio del estado de falla, después de la inyección de la falla. Esto ocurre en todos los casos. Los valores de pre-falla, presentan un comportamiento estable y sin oscilaciones numéricas.

Las señales de corriente son estables y aumentan después de la ocurrencia de la falla, sin presentar distorsiones.

- Para la fase B: ($T_{falla} = 72.222$ ms)

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

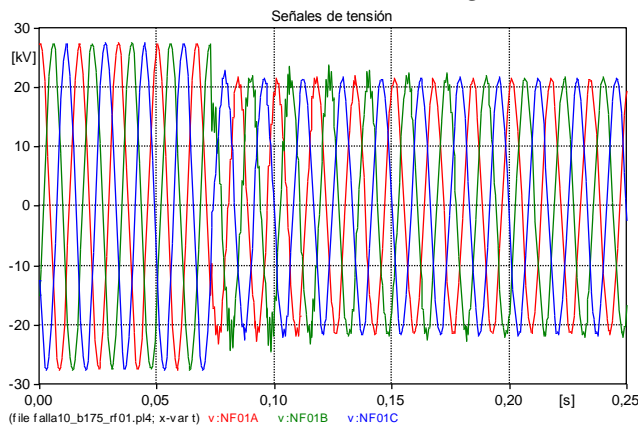


Figura A.2.73. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase B.

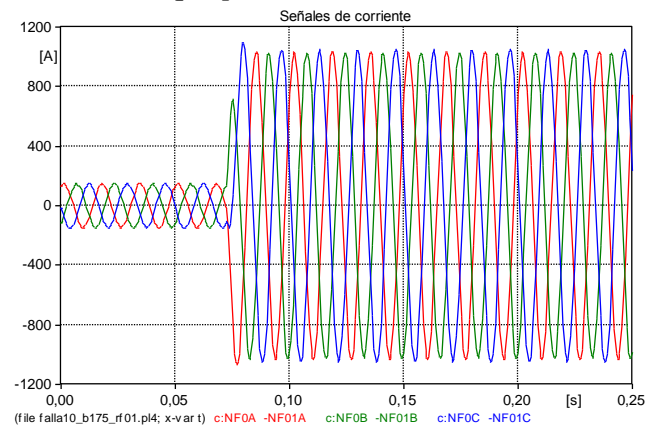


Figura A.2.74. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

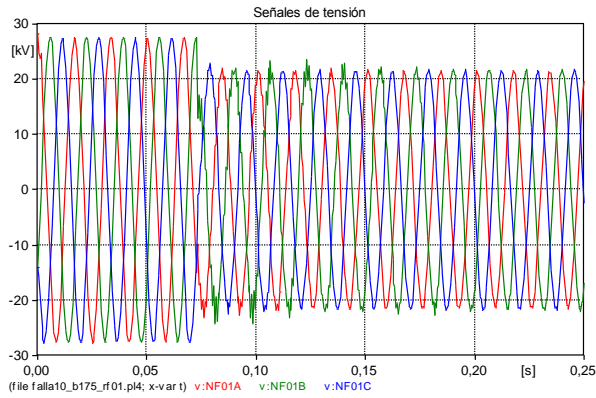


Figura A.2.75. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

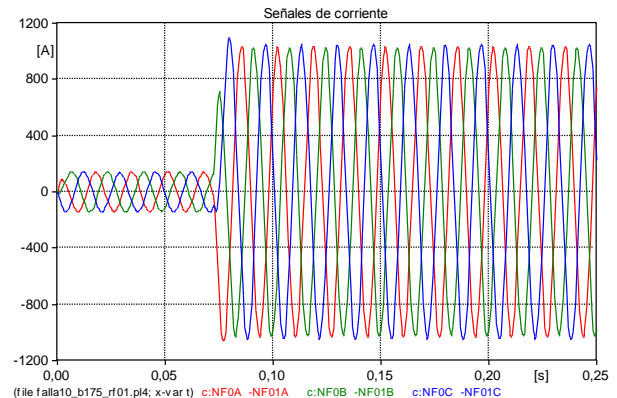


Figura A.2.76. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

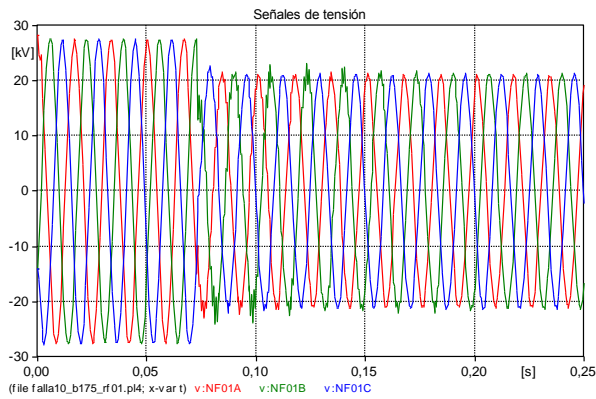


Figura A.2.77. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

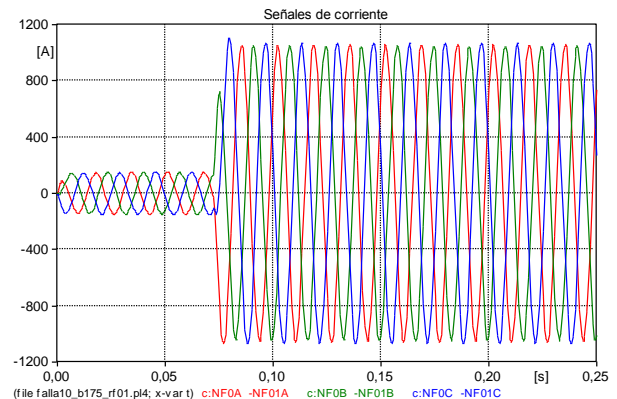


Figura A.2.78. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

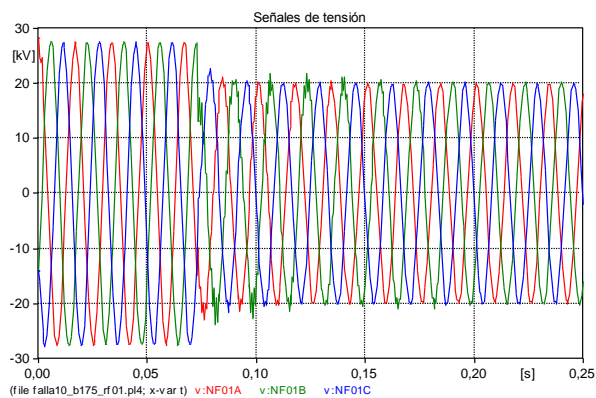


Figura A.2.79. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

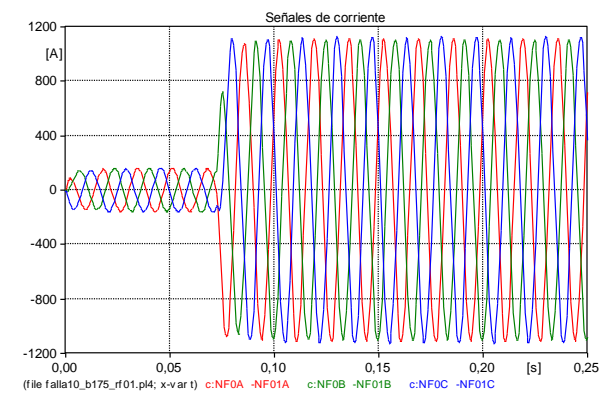


Figura A.2.80. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (V) en valor máximo positivo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

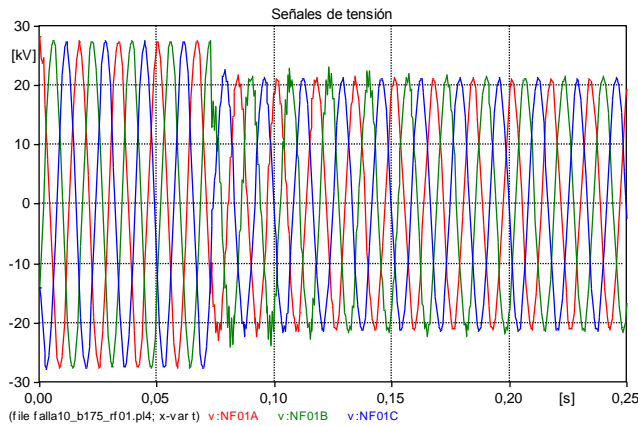


Figura A.2.81. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase B.

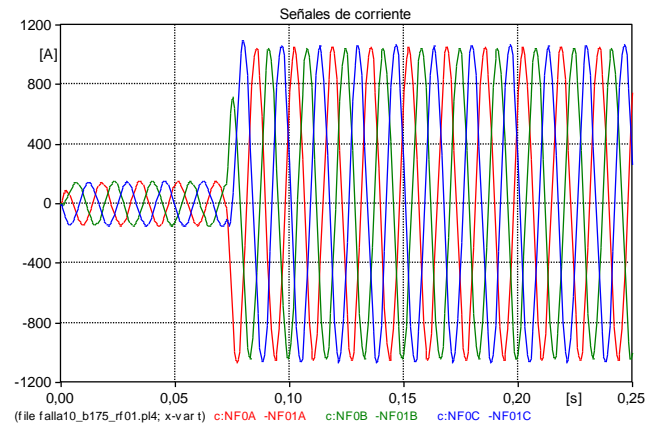


Figura A.2.82. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase B.

Conclusiones: Cuando la inyección de la falla se da en la fase B, se nota el mismo comportamiento que en el caso anterior.

Las señales de tensión y corriente presentan el mismo comportamiento en el caso base y en los casos de modelo de la carga simulado con la herramienta de *Models*.

Se observa una distorsión inicial después de la inyección de la falla en la señal de tensión y luego se estabiliza.

Los valores de la señal de tensión y corriente en pre-falla presentan un comportamiento estable. En falla la señal de corriente no presenta distorsión y es estable en un valor mayor.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 77.7778$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

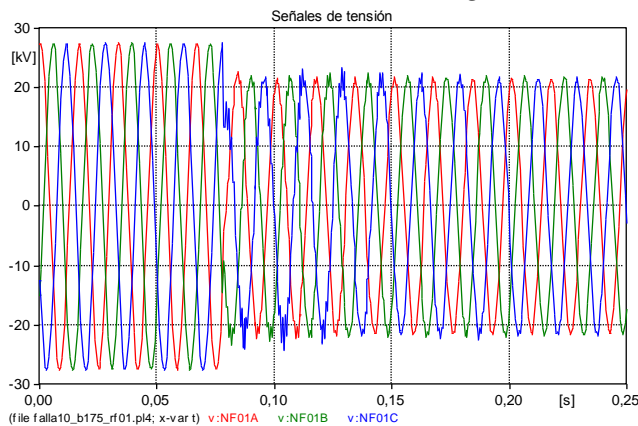


Figura A.2.83. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

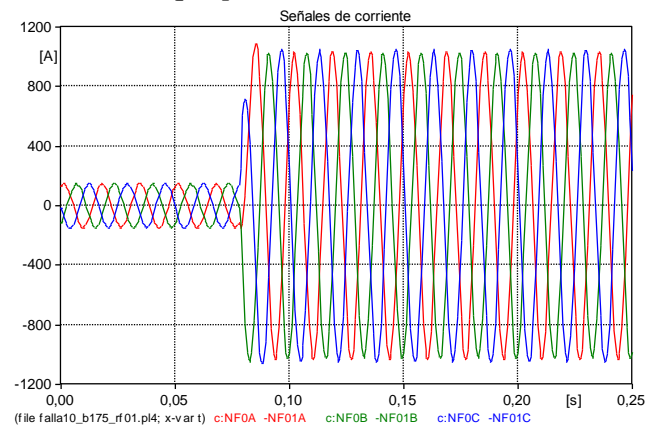


Figura A.2.84. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

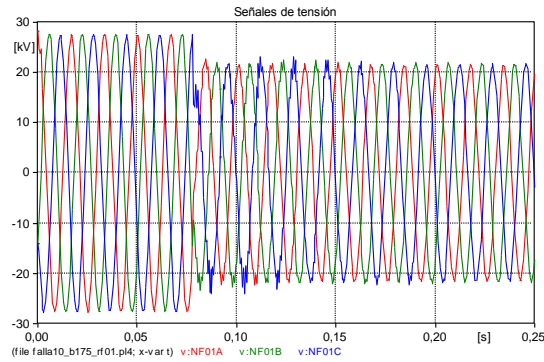


Figura A.2.85. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

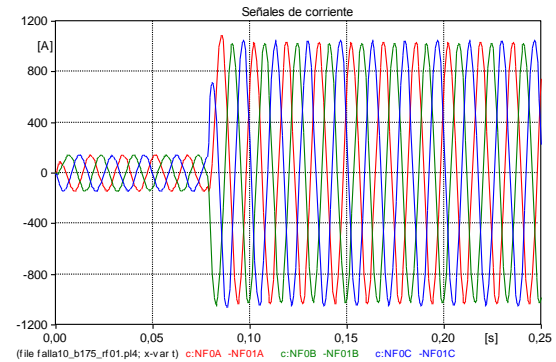


Figura A.2.86. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

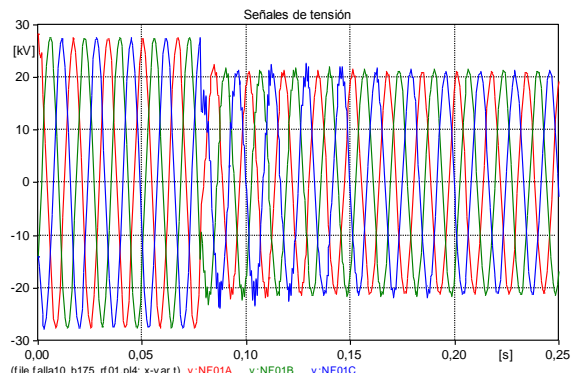


Figura A.2.87. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

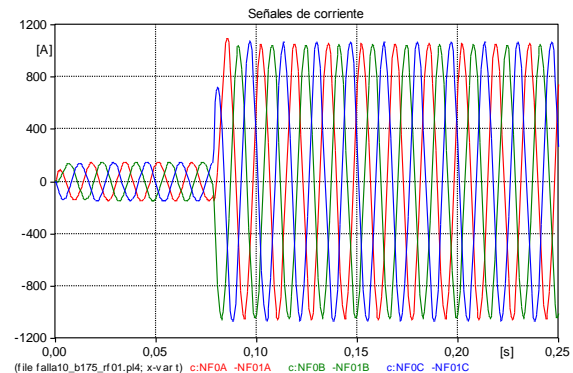


Figura A.2.88. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

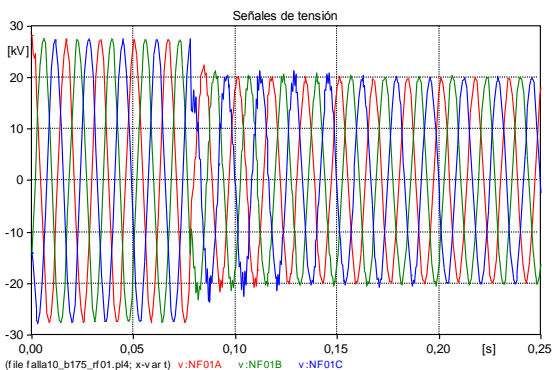


Figura A.2.89. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

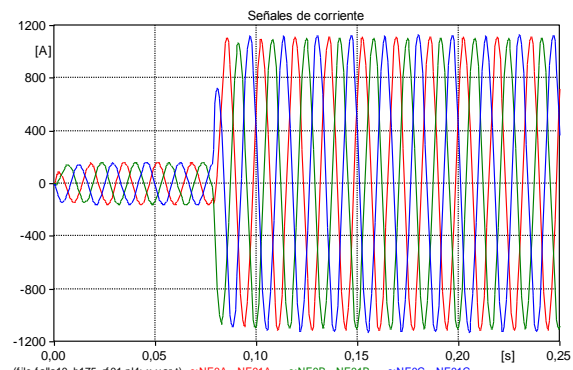


Figura A.2.90. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

○ Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como 0.2Zcte mas 0.8Icte (caso híbrido).

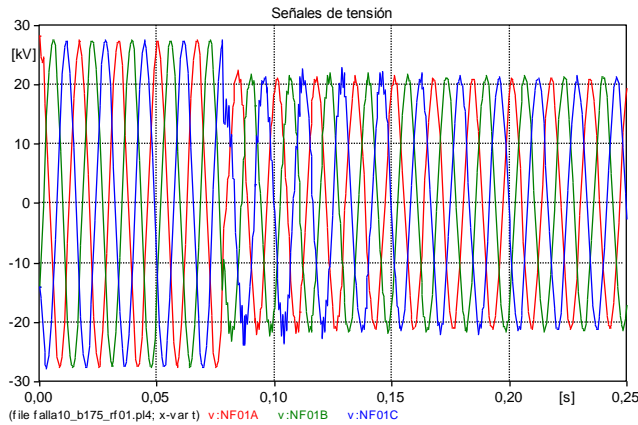


Figura A.2.91. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

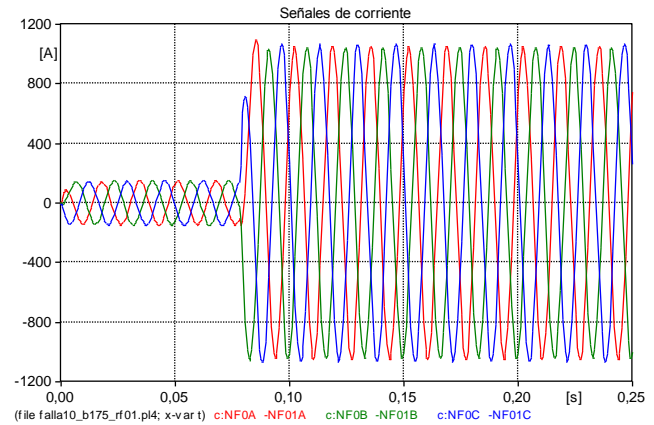


Figura A.2.92. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo positivo en la fase C.

Conclusiones: Al igual que para las fases anteriores, cuando la inyección de la falla se da en el valor máximo de la señal de tensión, en este caso en la fase C, todos los casos de modelo de la carga presentan el mismo comportamiento, esto muestra el correcto funcionamiento del modelo en cuanto a la correcta reproducción de las señales.

La señal de tensión en pre-falla es estable hasta la ocurrencia de la falla, en donde desciende, presentado una leve perturbación y luego se estabiliza en el estado de falla.

Las señales de corriente son estables en sus valores de pre-falla y falla.

d. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de tensión (V) en valor intermedio negativo.

- Para la fase A: ($T_{falla} = 61.111 \text{ ms}$)

- Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).

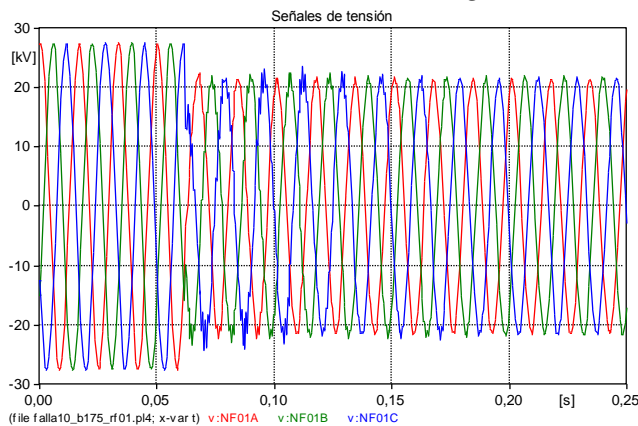


Figura A.2.93. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

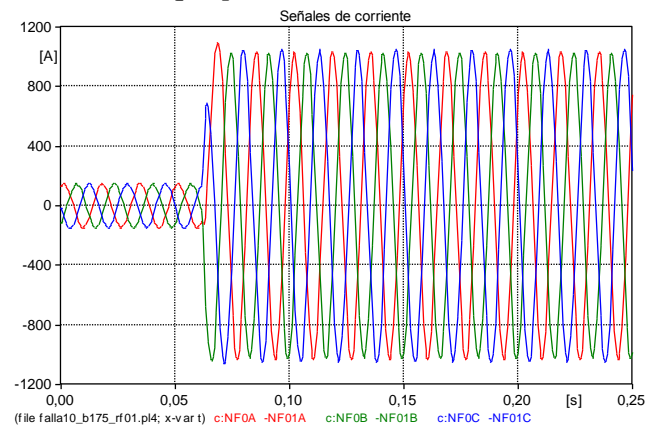


Figura A.2.94. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

- Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.

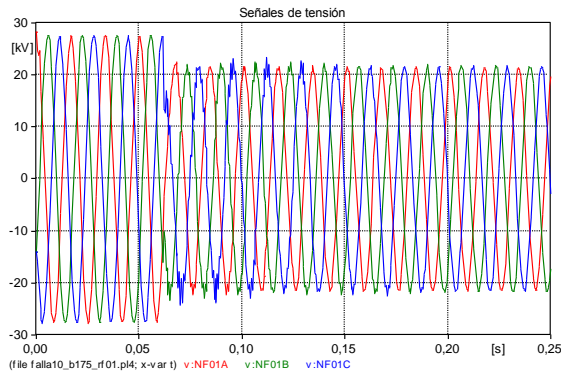


Figura A.2.95. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

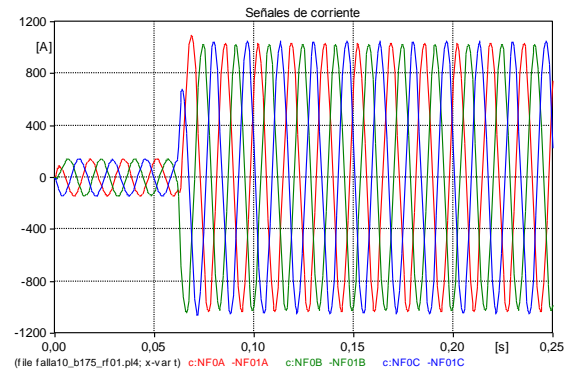


Figura A.2.96. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

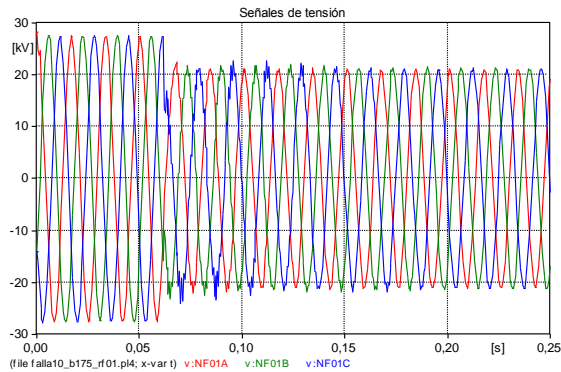


Figura A.2.97. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

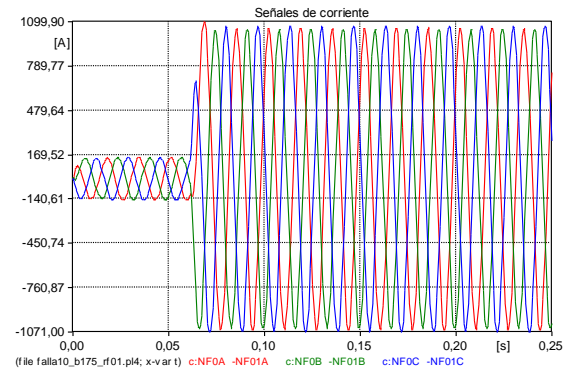


Figura A.2.98. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

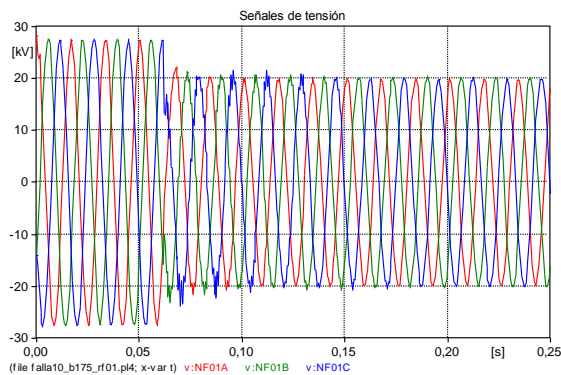


Figura A.2.99. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

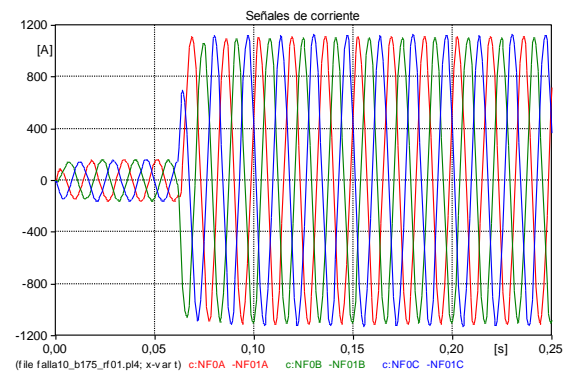


Figura A.2.100. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la seale (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

○ *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como 0.2Zcte mas 0.8Icte (caso híbrido).*

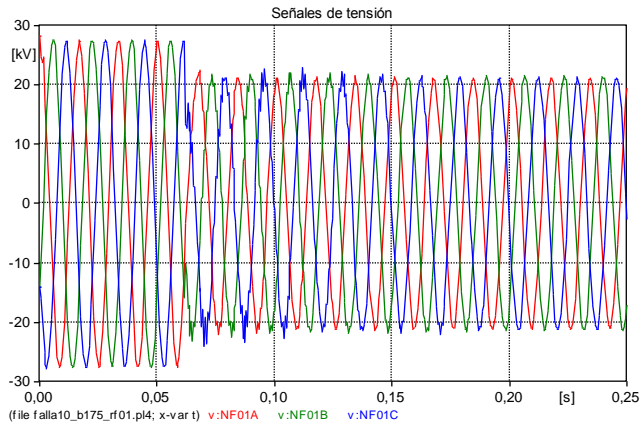


Figura A.2.101. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

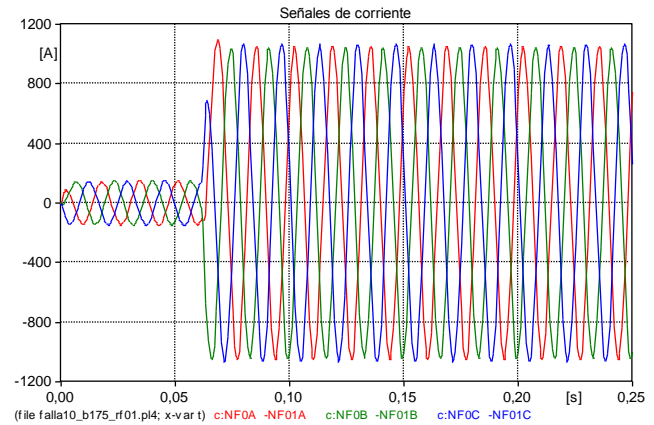


Figura A.2.102. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase A.

Conclusiones: Todos los casos de modelo de la carga presentan el mismo comportamiento en las señales de tensión y corriente.

Al igual que en casos anteriores, después de la inyección de la falla se presenta una distorsión en la tensión que luego se estabiliza.

Los valores de pre-falla de tensión y corriente son estables, al igual los valores de falla, pero con un valor más grande en el caso de la corriente y más pequeño en el caso de la tensión en las fases falladas.

- **Para la fase B: ($T_{\text{falla}} = 66.6667$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

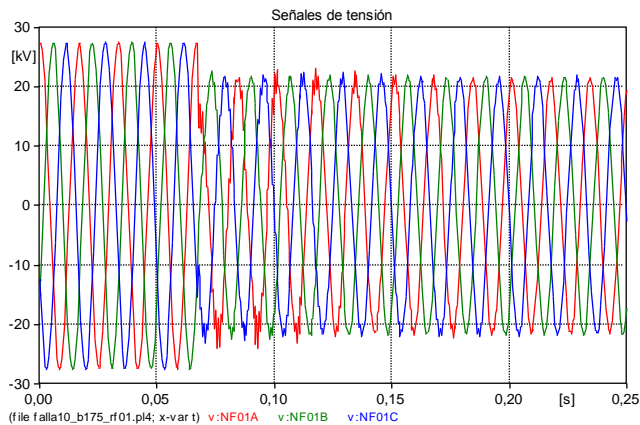


Figura A.2.103. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

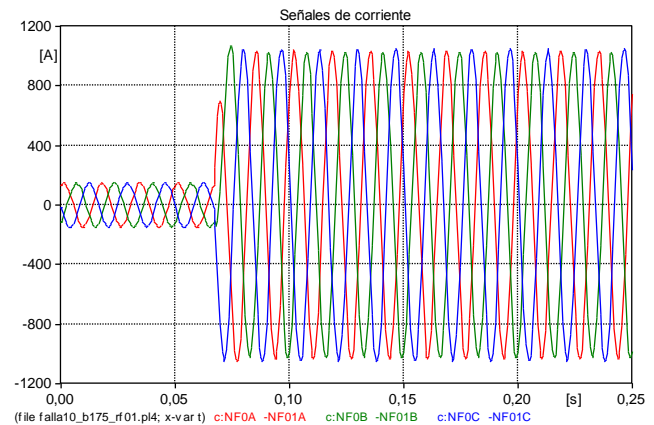


Figura A.2.104. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

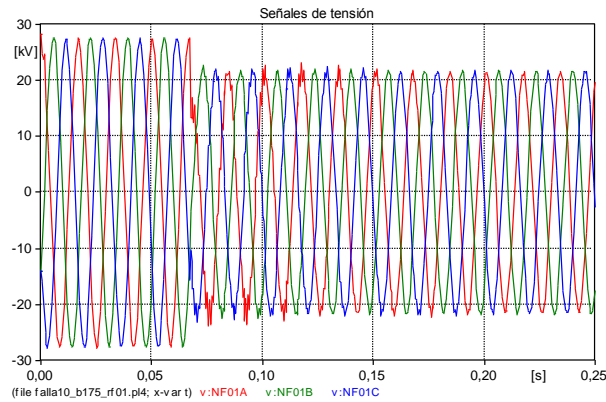


Figura A.2.105. Señales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

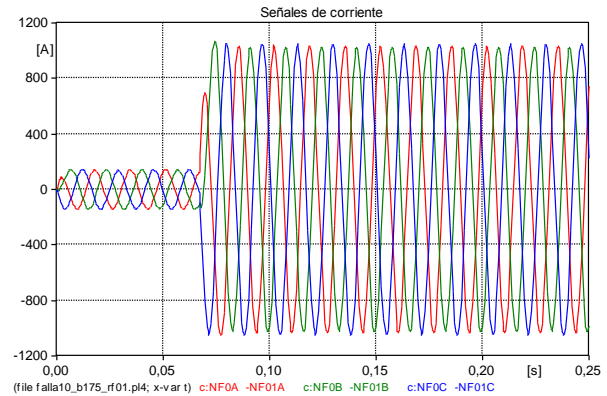


Figura A.2.106. Señales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

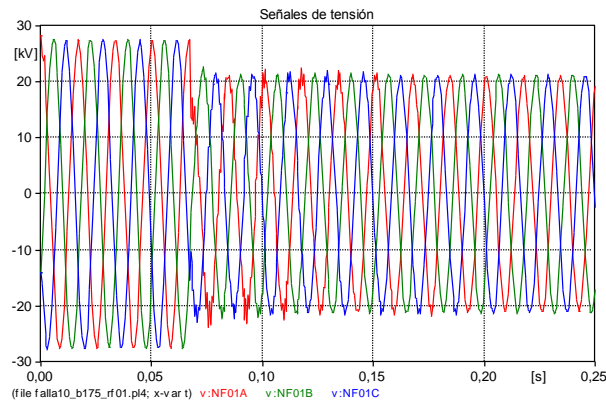


Figura A.2.107. Señales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

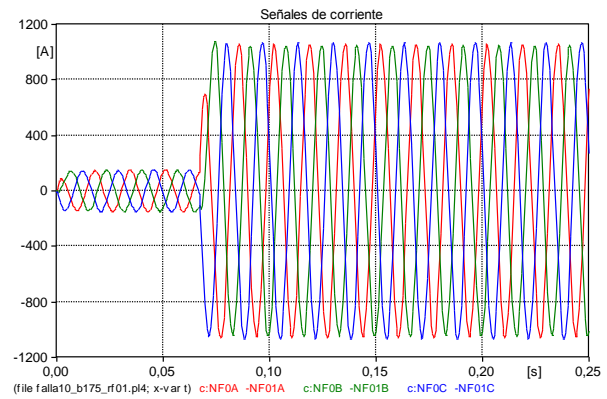


Figura A.2.108. Señales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

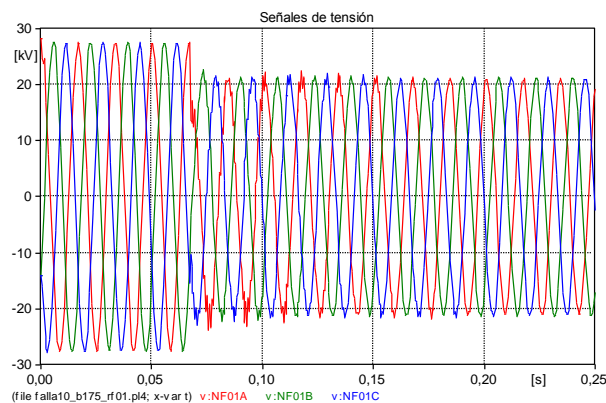


Figura A.2.109. Señales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

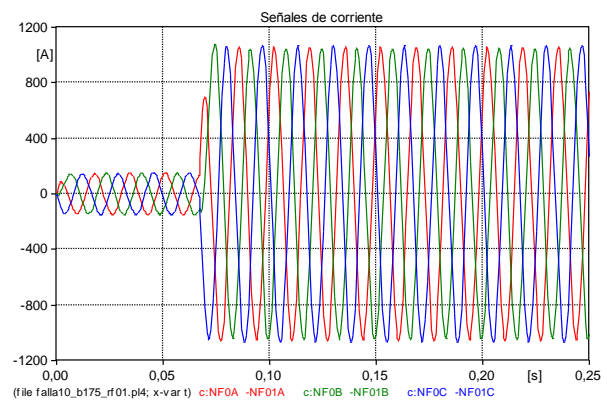


Figura A.2.110. Señales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

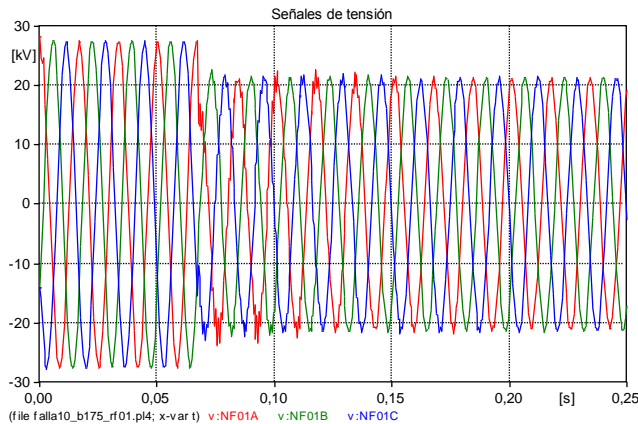


Figura A.2.111. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

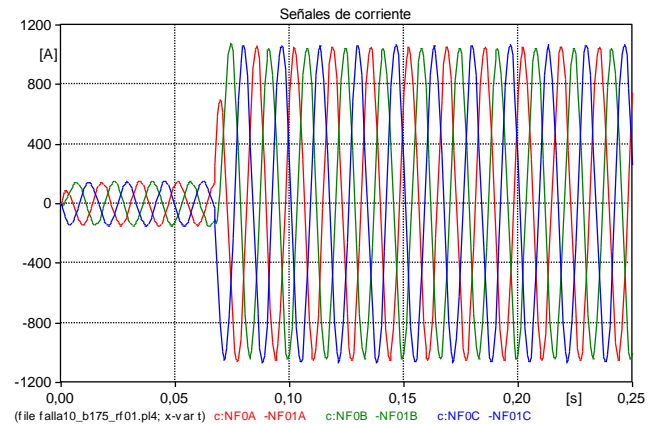


Figura A.2.112. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase B.

Conclusiones: Se presenta el mismo comportamiento para las señales de tensión y corriente en todos los casos.

Se observan distorsiones en las señales de tensión al inicio del estado de falla, después de la inyección de la falla. Esto ocurre en todos los casos. Los valores de pre-falla, presentan un comportamiento estable y sin oscilaciones numéricas.

Las señales de corriente son estables y aumentan después de la ocurrencia de la falla, sin presentar distorsiones.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 72.222$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

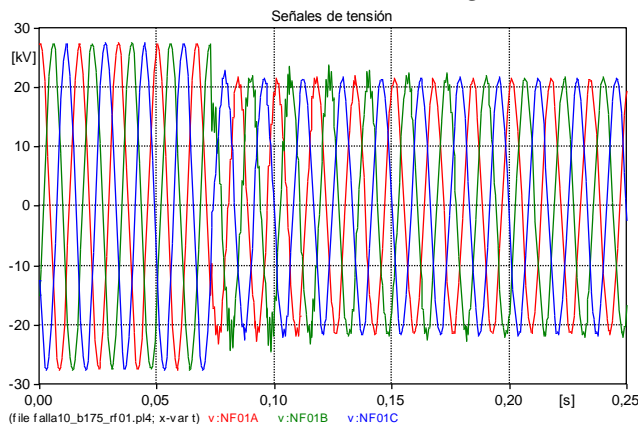


Figura A.2.113. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

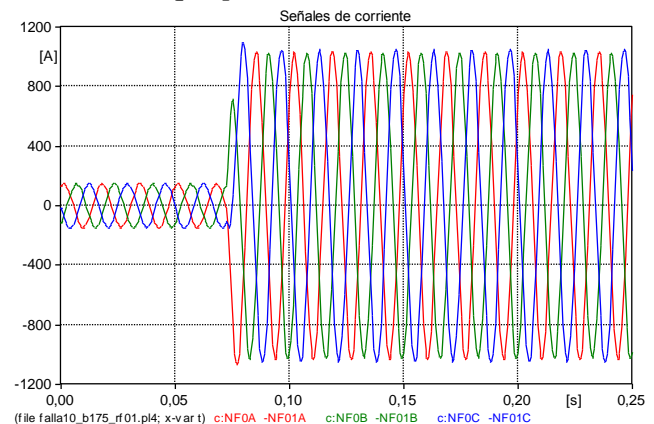


Figura A.2.114. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

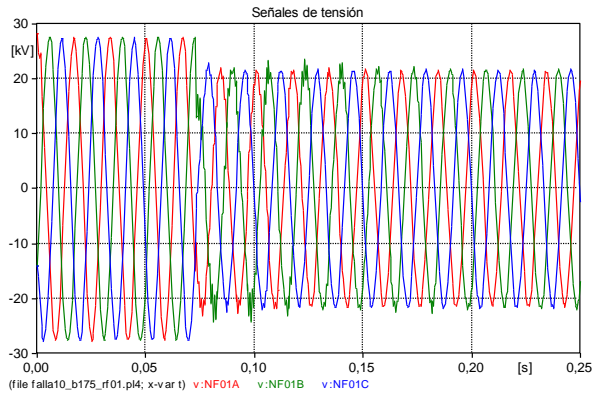


Figura A.2.115. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

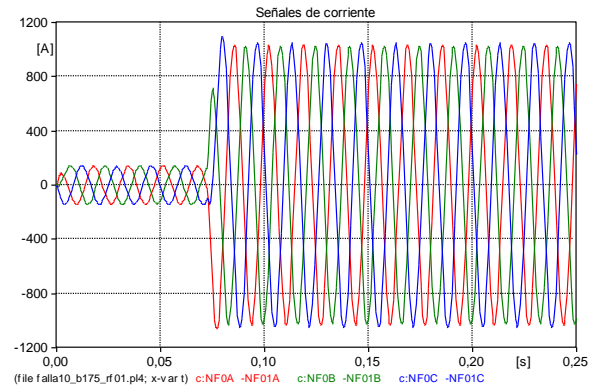


Figura A.2.116. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

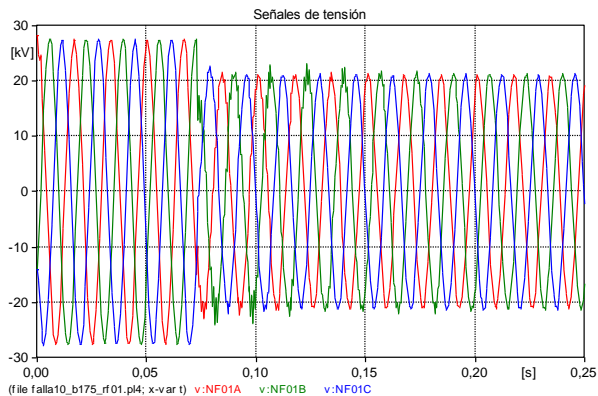


Figura A.2.117. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

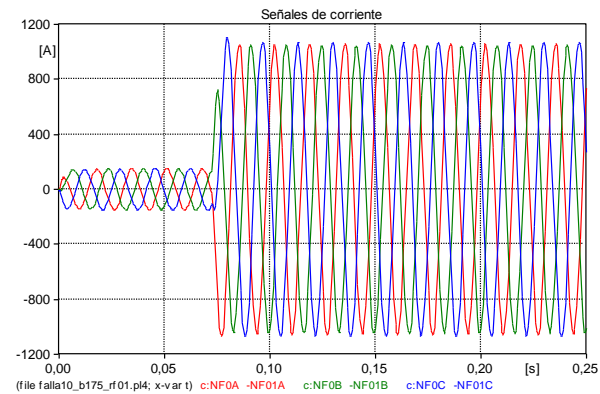


Figura A.2.118. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

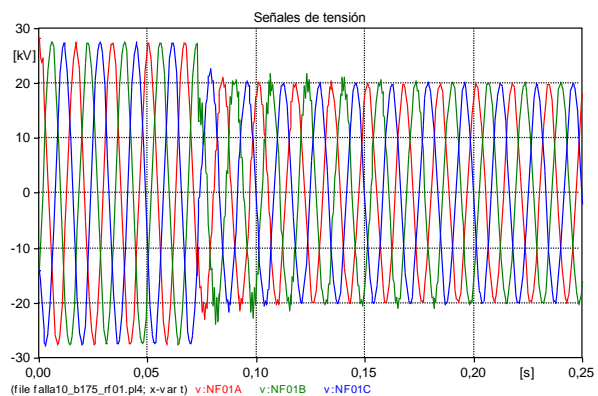


Figura A.2.119. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

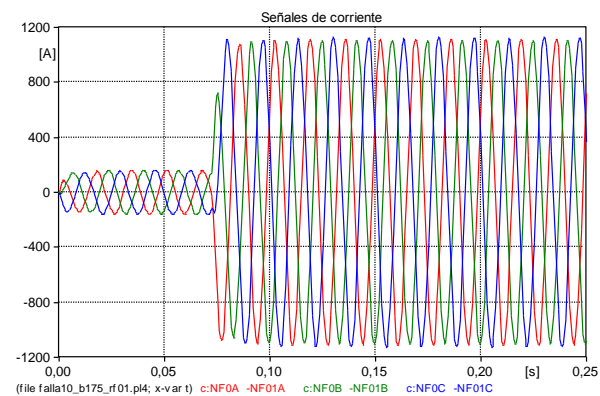


Figura A.2.120. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

- Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).

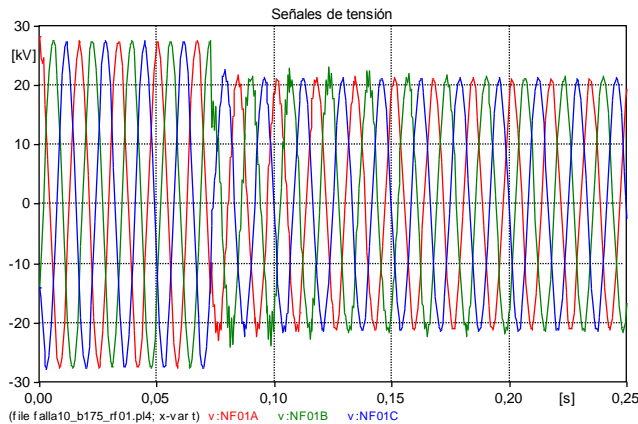


Figura A.2.121. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

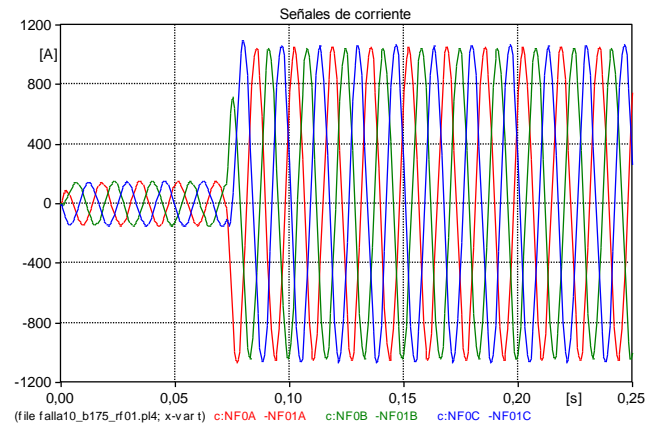


Figura A.2.122. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor intermedio negativo en la fase C.

Conclusiones: Cuando la inyección de la falla se da en la fase B, se nota el mismo comportamiento que en el caso anterior.

Las señales de tensión y corriente presentan el mismo comportamiento en el caso base y en los casos de modelo de la carga simulado con la herramienta de *Models*.

Se observa una distorsión inicial después de la inyección de la falla en la señal de tensión y luego se estabiliza.

Los valores de la señal de tensión y corriente en pre-falla presentan un comportamiento estable. En falla la señal de corriente no presenta distorsión y es estable en un valor mayor.

e. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de tensión (V) en valor máximo negativo.

- Para la fase A: ($T_{falla} = 75$ ms)

- Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).

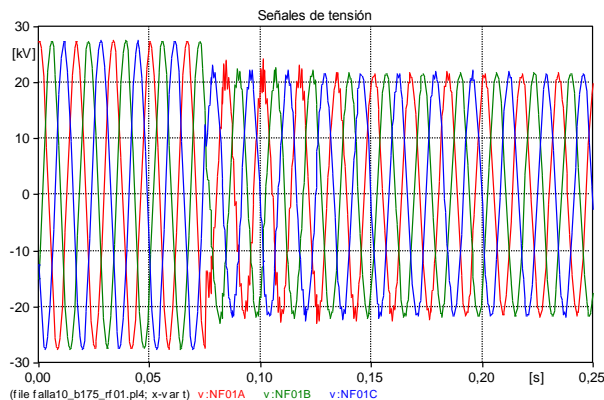


Figura A.2.123. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase A.

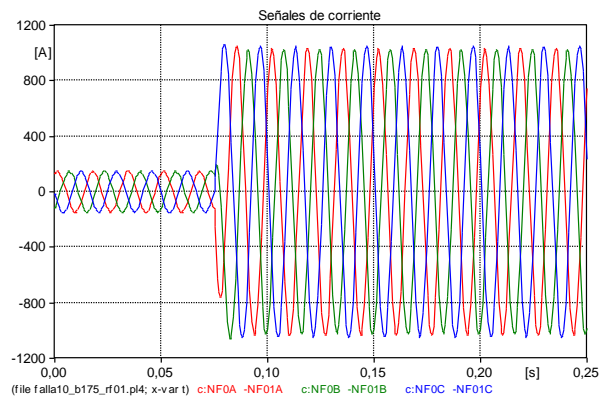


Figura A.2.124. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

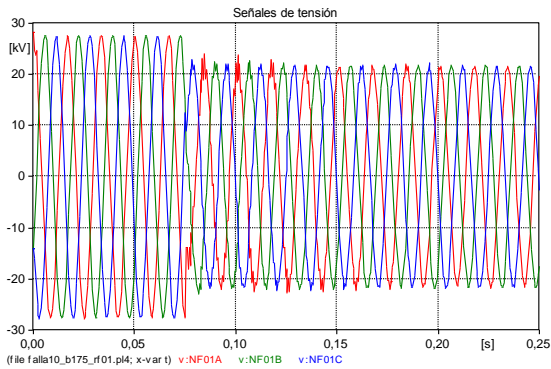


Figura A.2.125. Seales de Tensión con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

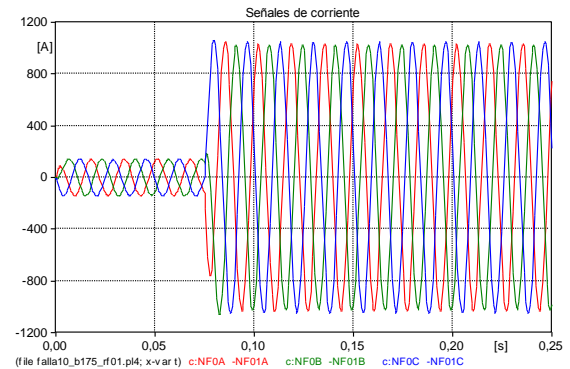


Figura A.2.126. Seales de corriente con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

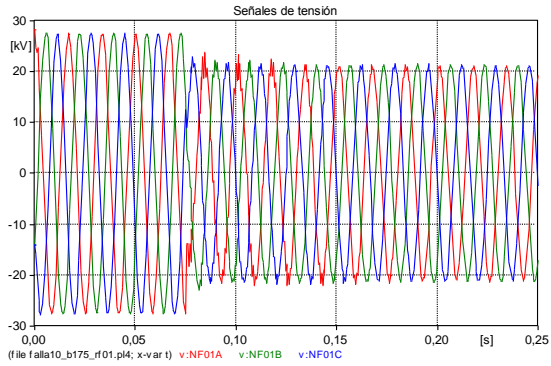


Figura A.2.127. Seales de Tensión con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

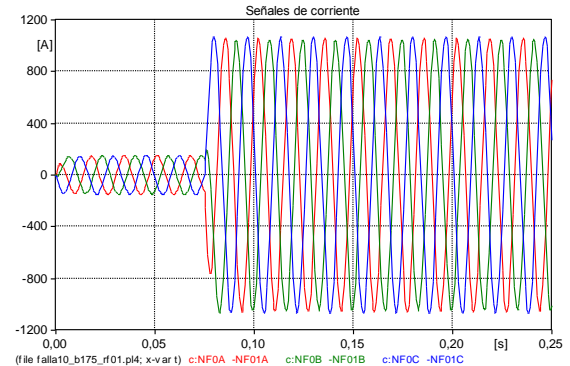


Figura A.2.128. Seales de corriente con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

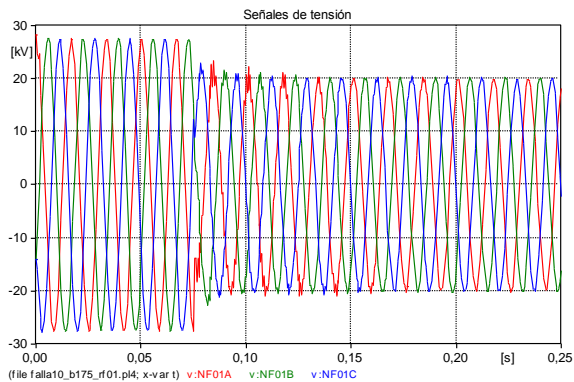


Figura A.2.129. Seales de Tensión con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

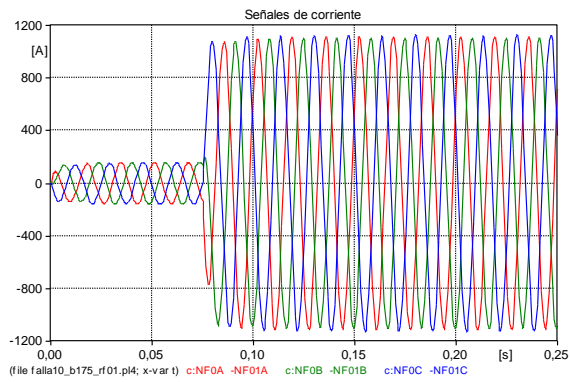


Figura A.2.130. Seales de corriente con in cepción de falla teniendo en cuenta la se al (V) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

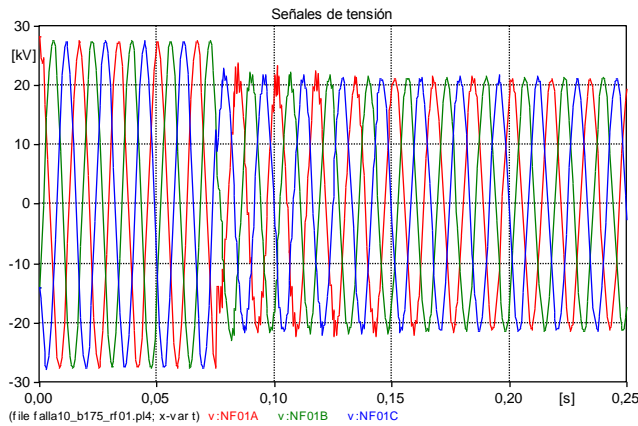


Figura A.2.131. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase A.

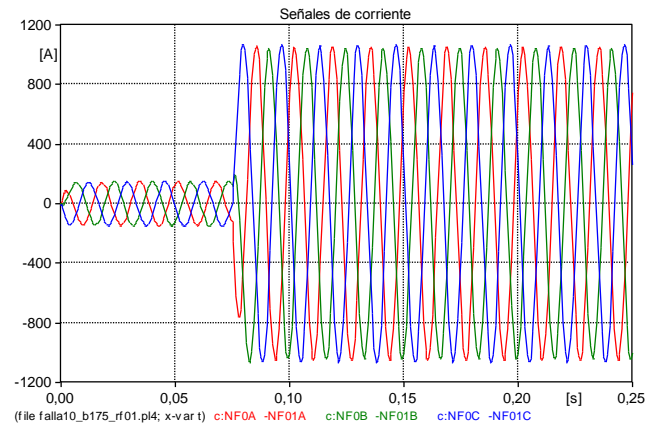


Figura A.2.132. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase A.

Conclusiones: Las señales de tensión y corriente presentan el mismo comportamiento en los modelos de la carga programados que en el caso base.

Se nota estabilidad en las señales de tensión en estado de pre-falla y falla, aunque inicialmente, después de la inyección de la falla se presenta una distorsión en la tensión que luego se estabiliza, esta distorsión se presenta en todos los casos.

Las señales de corriente permanecen estables en estado de pre-falla y aumentan en estado de falla, estabilizándose en un valor; además no presentan distorsión.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 63.8889$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

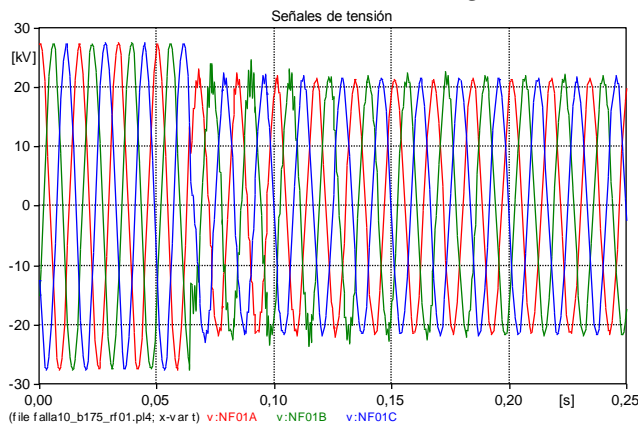


Figura A.2.133. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

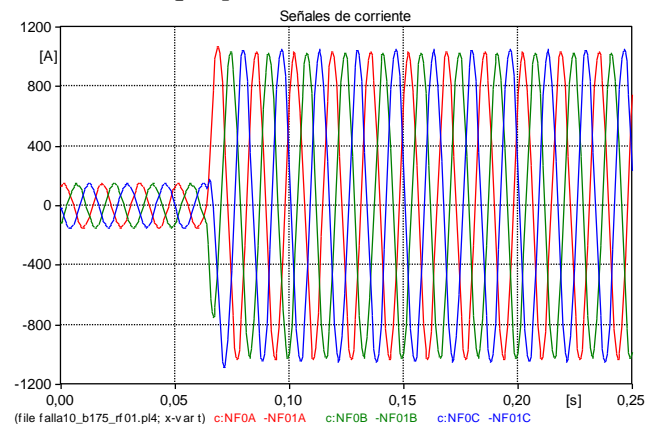


Figura A.2.134. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

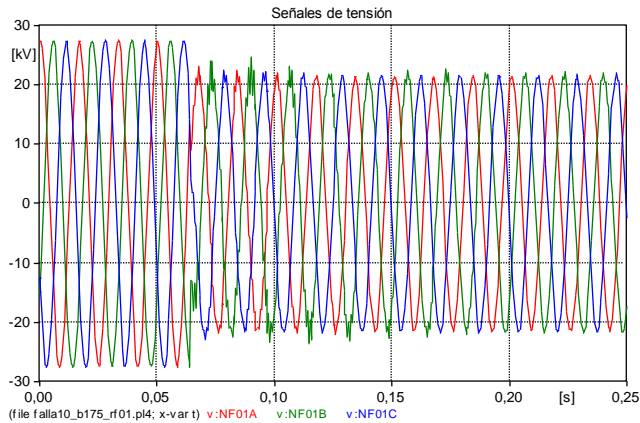


Figura A.2.135. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

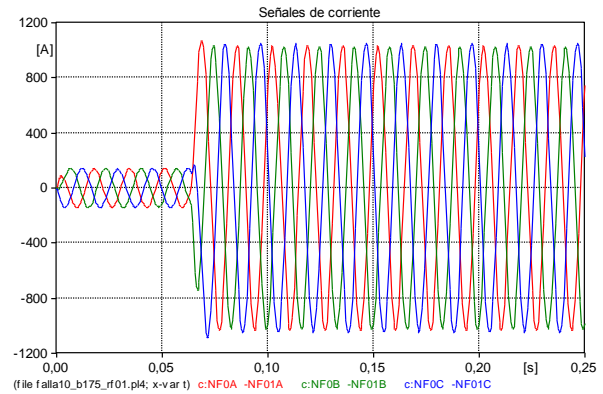


Figura A.2.136. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

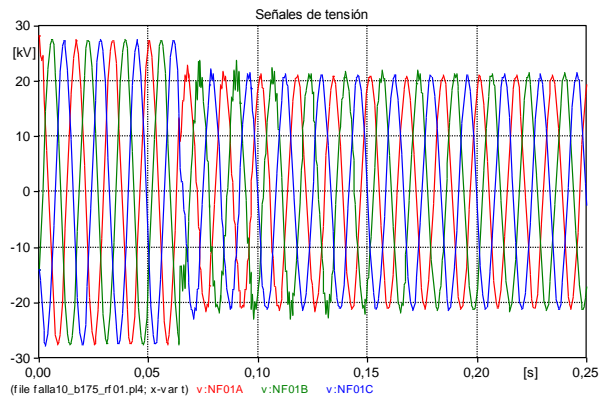


Figura A.2.137. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

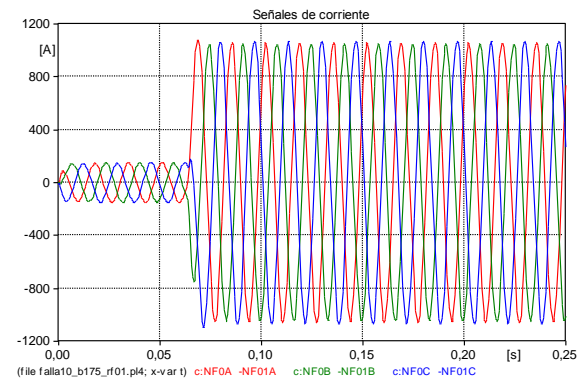


Figura A.2.138. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

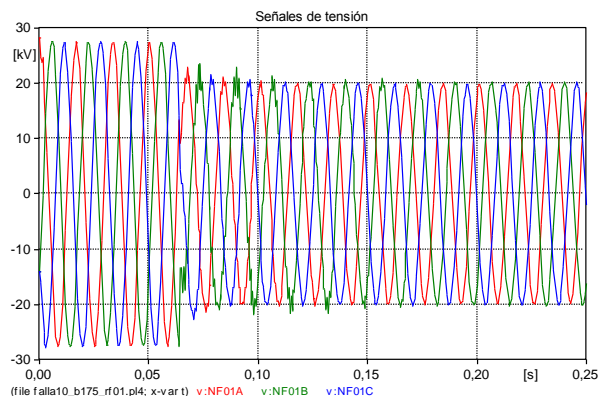


Figura A.2.139. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal

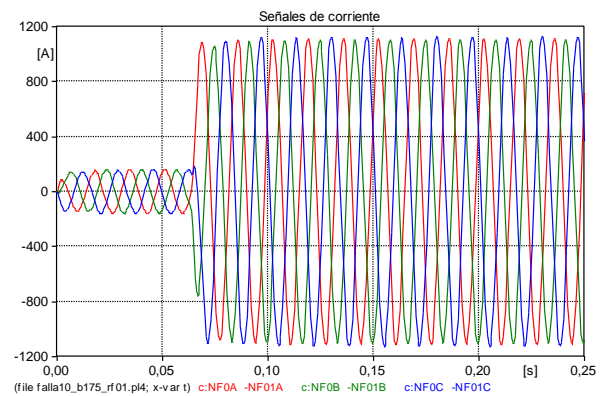


Figura A.2.140. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal

(V) en valor máximo negativo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como 0.2Zcte mas 0.8Icte (caso híbrido).*

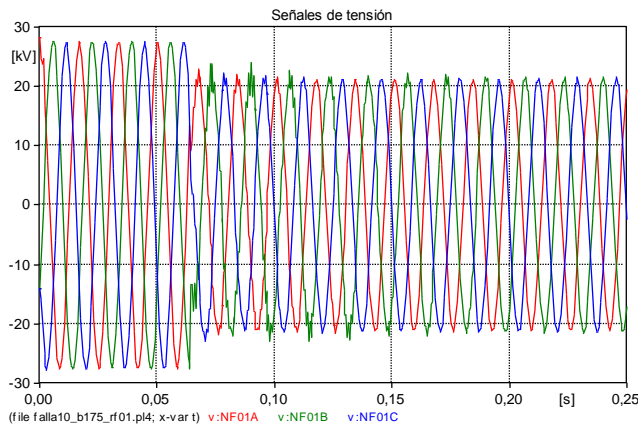


Figura A.2.141. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

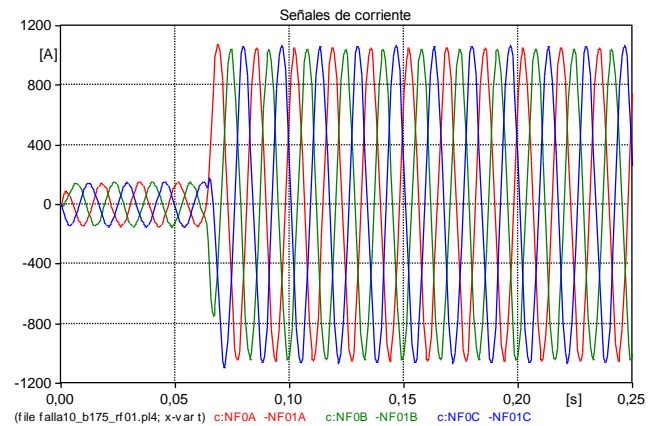


Figura A.2.142. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase B.

Conclusiones: Los modelos de la carga comparados presentan el mismo comportamiento que el caso base en las señales de tensión y corriente.

El valor de tensión presenta una distorsión después de ocurrida la falla que luego se estabiliza.

La corriente no presenta oscilaciones en su valor de pre-falla y luego de la falla aumenta y se estabiliza rápidamente.

- **Para la fase C: ($T_{\text{falla}} = 69.4444 \text{ ms}$)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

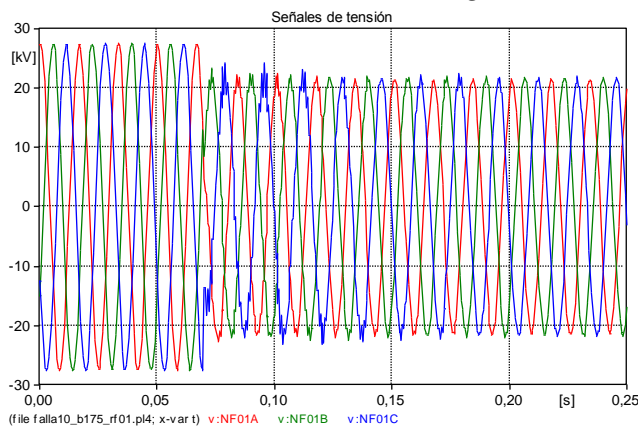


Figura A.2.143. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

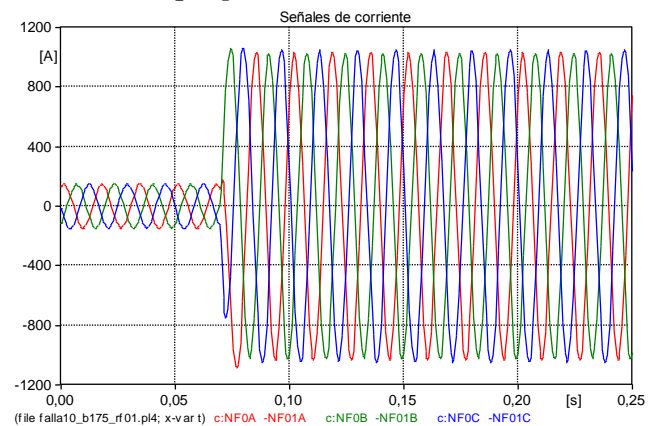


Figura A.2.144. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

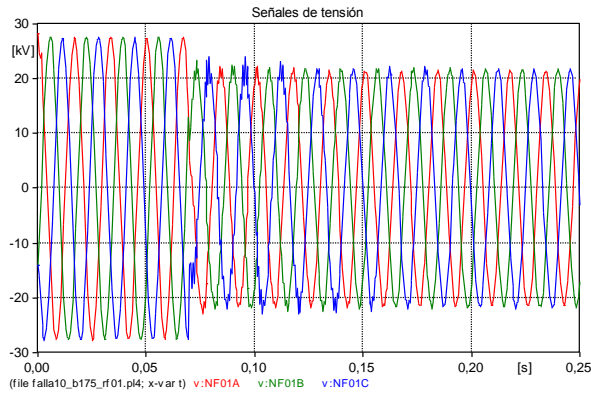


Figura A.2.145. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

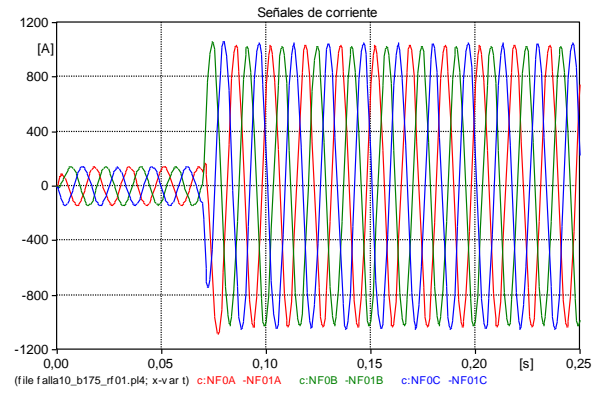


Figura A.2.146. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

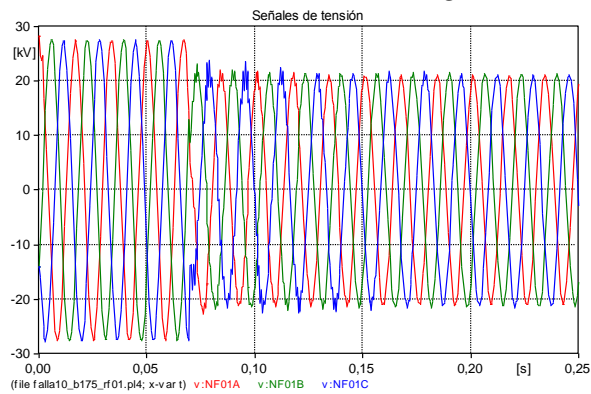


Figura A.2.147. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

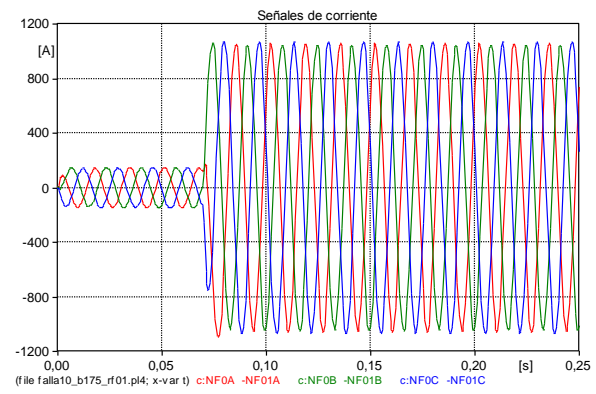


Figura A.2.148. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

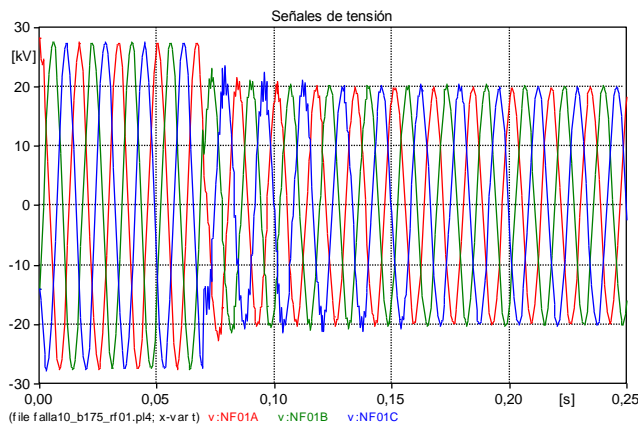


Figura A.2.149. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

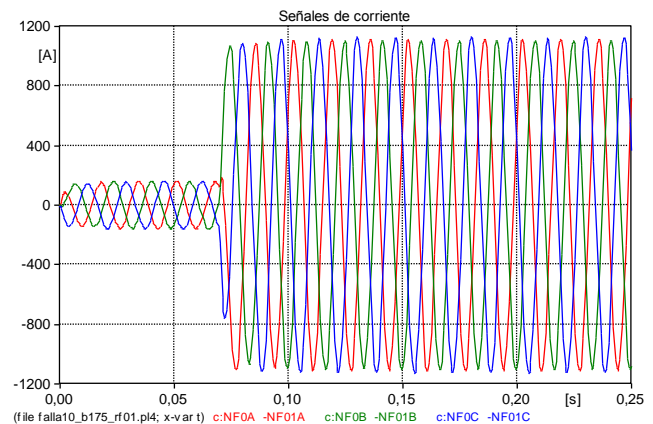


Figura A.2.150. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

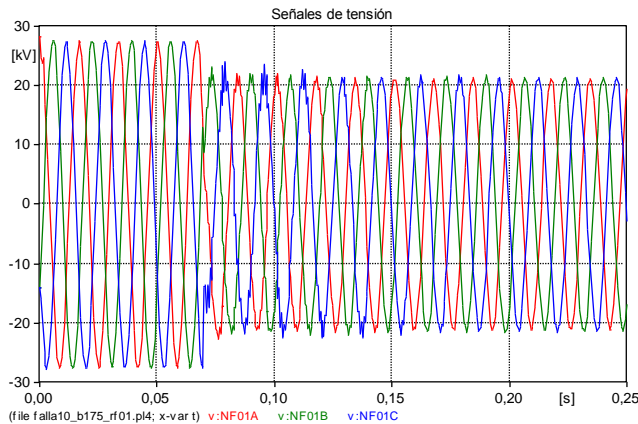


Figura A.2.151. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

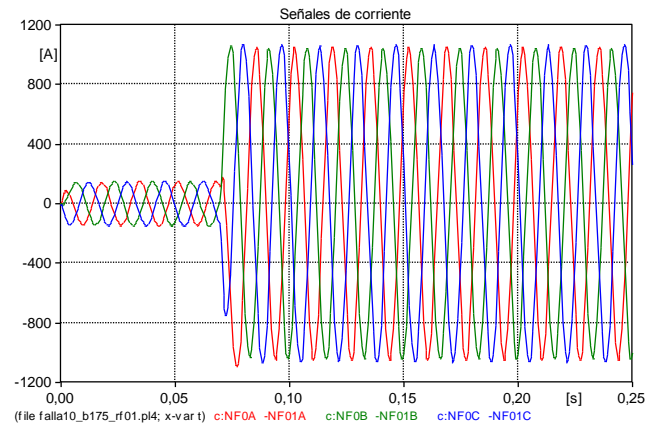


Figura A.2.152. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (V) en valor máximo negativo en la fase C.

Conclusiones: El comportamiento de las señales de tensión y corriente del caso base de impedancia constante y de los modelos de la carga tenidos en cuenta son los mismos.

Los valores de pre-falla de las señales de tensión son estables y no se presenta oscilaciones. En estado de falla, las señales de tensión presentan inicialmente una distorsión que es común en todos los modelos de carga incluyendo el caso base y luego se estabilizan.

Las señales de corriente son estables en estado de pre-falla y de falla, sin presentar distorsiones, aunque en falla presentan un valor mayor.

B. Análisis de la influencia de la falla con la señal de corriente (I).

a. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de corriente (I) en valor cero.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 63.623846$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

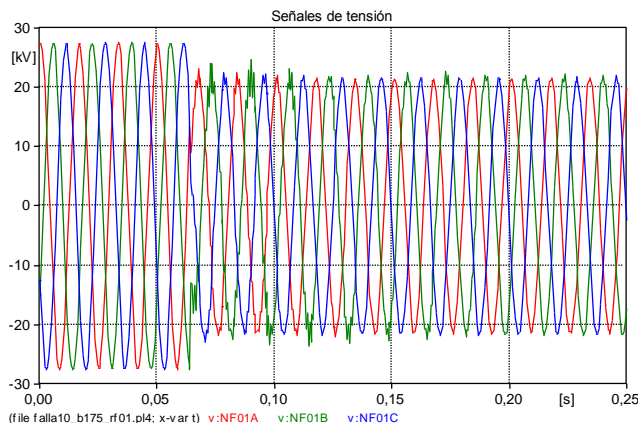


Figura A.2.153. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

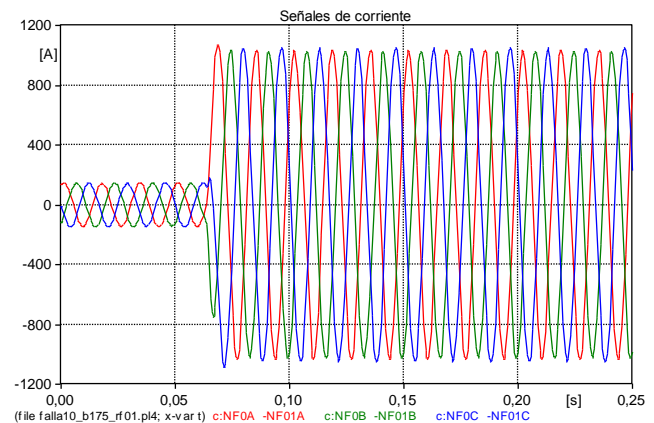


Figura A.2.154. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

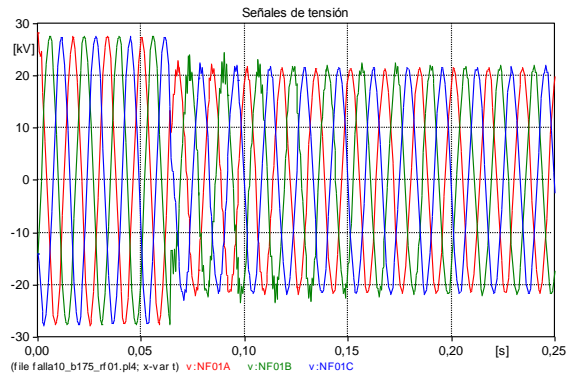


Figura A.2.155. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

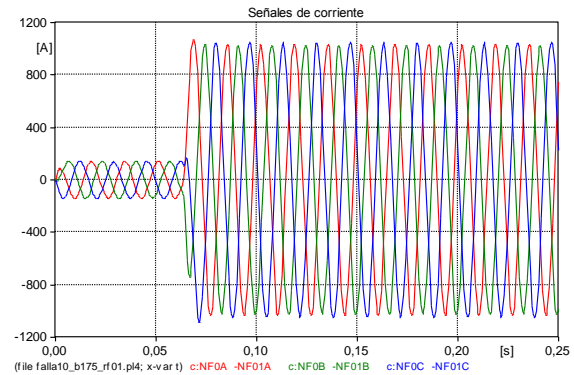


Figura A.2.156. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

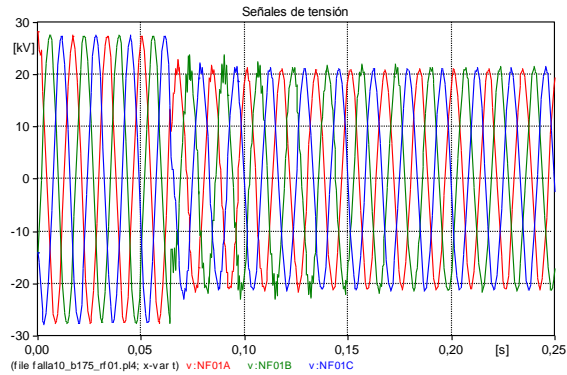


Figura A.2.157. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

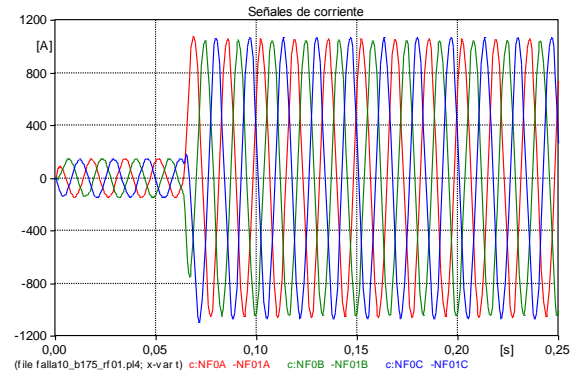


Figura A.2.158. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

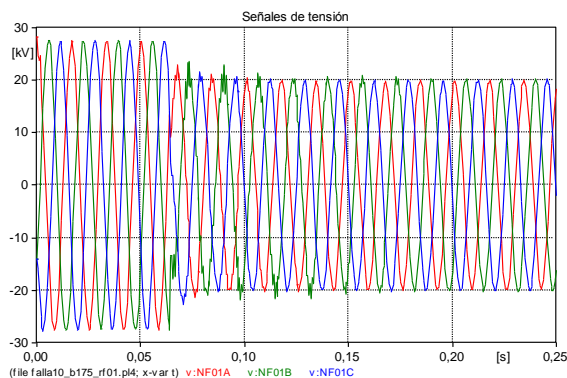


Figura A.2.159. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

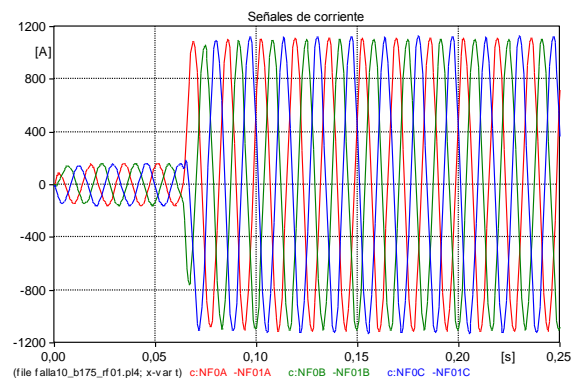


Figura A.2.160. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

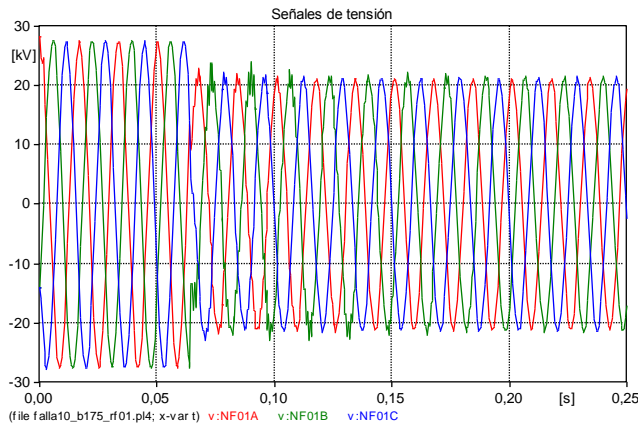


Figura A.2.161. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

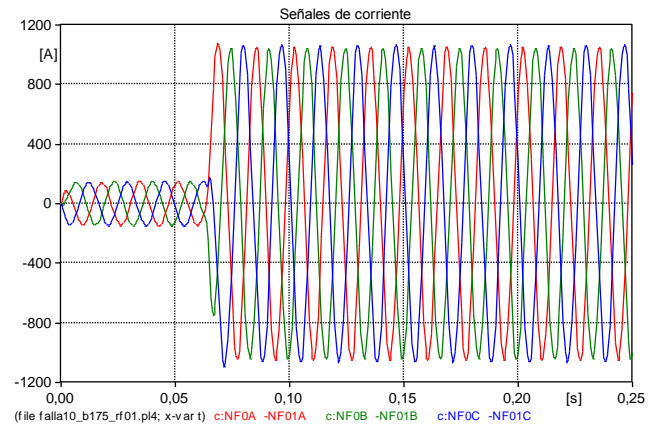


Figura A.2.162. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase A.

Conclusiones: Las señales de tensión y corriente de los modelos de la carga y del caso base presentan el mismo comportamiento.

La señal de tensión presenta un valor estable en estado de pre-falla, y en estado de falla, se nota una distorsión inicial y luego se estabiliza.

La señal de corriente se comporta de forma estable sin presentar ruidos en la señal u oscilaciones numéricas.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 69.16561$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

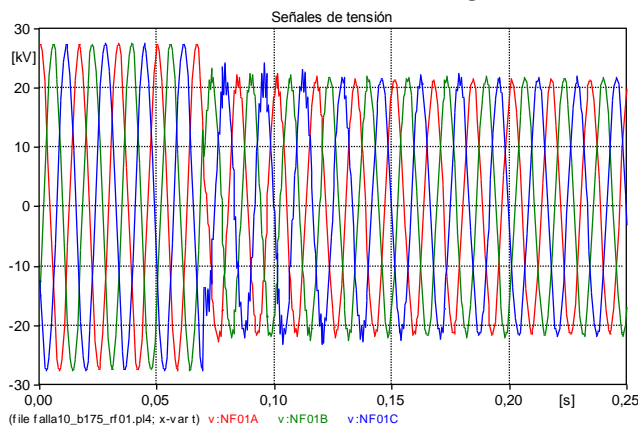


Figura A.2.163. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

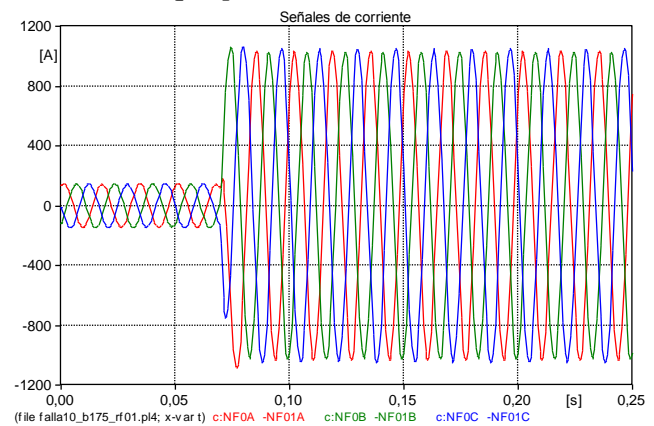


Figura A.2.164. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

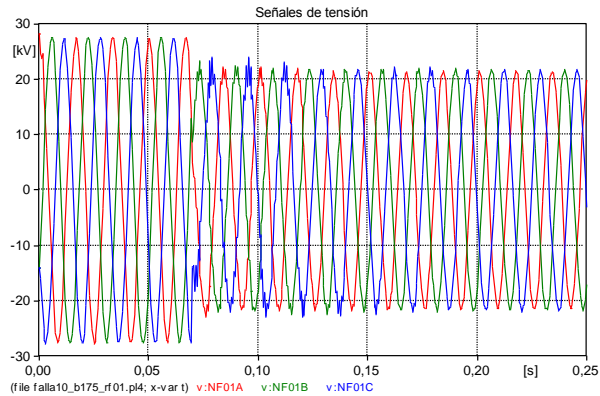


Figura A.2.165. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

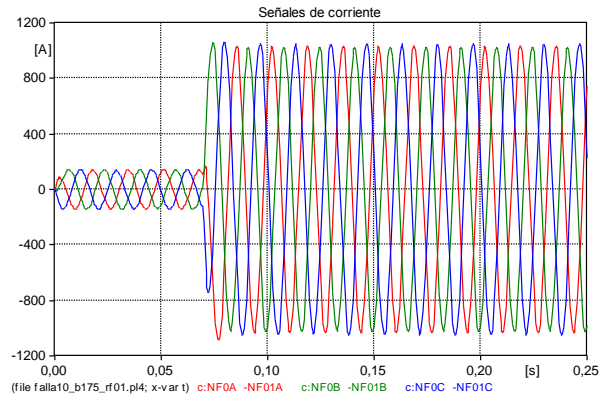


Figura A.2.166. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

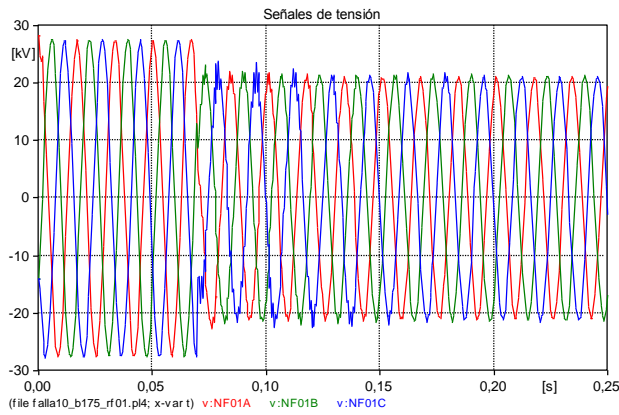


Figura A.2.167. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

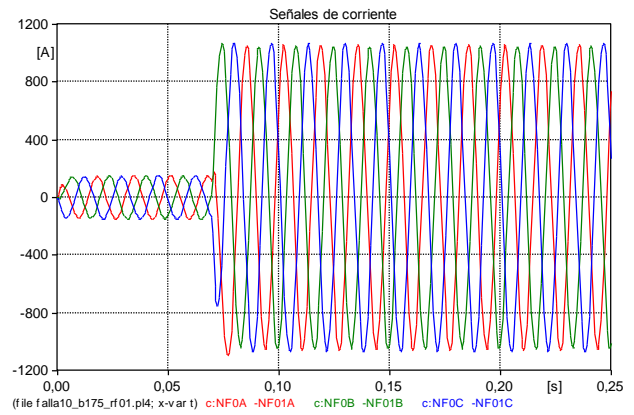


Figura A.2.168. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

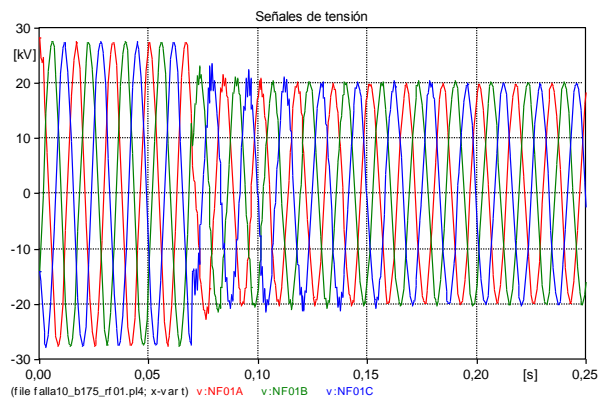


Figura A.2.169. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

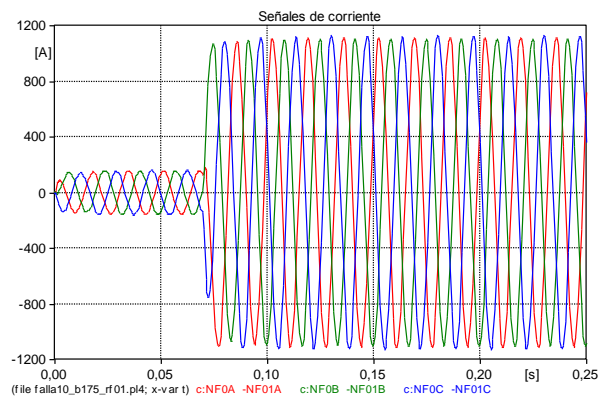


Figura A.2.170. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

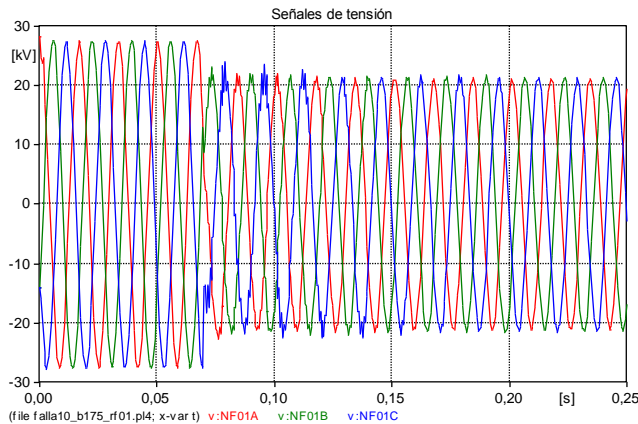


Figura A.2.171. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

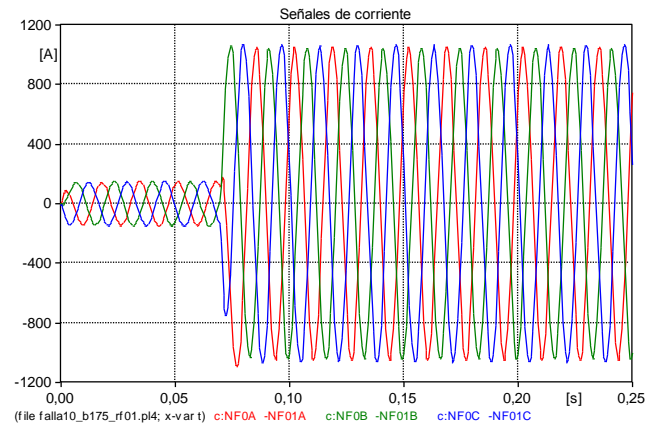


Figura A.2.172. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase B.

Conclusiones: Las señales de tensión y corriente presentan el mismo comportamiento para los diferentes modelos de la carga analizados, si presentar oscilaciones numéricas.

Se presenta distorsión en la señal de tensión después de ocurrida la falla, la cual se estabiliza después de algunos ciclos.

Las señales de corriente presentan un comportamiento estable en pre-falla, luego en el estado de falla aumentan su valor, pero también se estabilizan, sin presentar distorsiones.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 74.7238$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

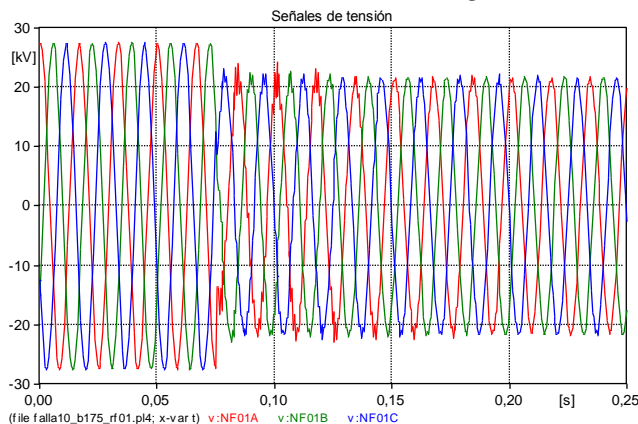


Figura A.2.173. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

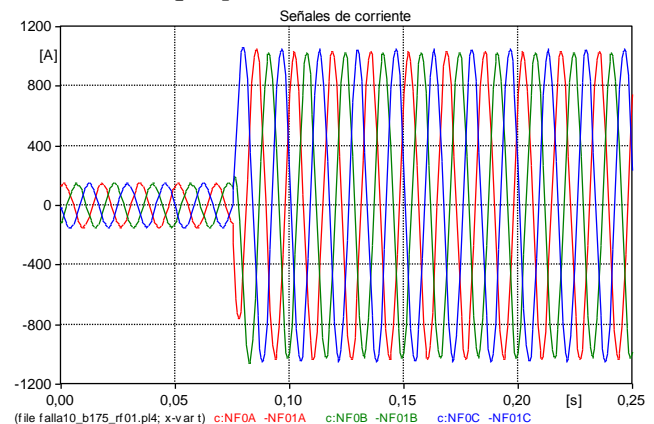


Figura A.2.174. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

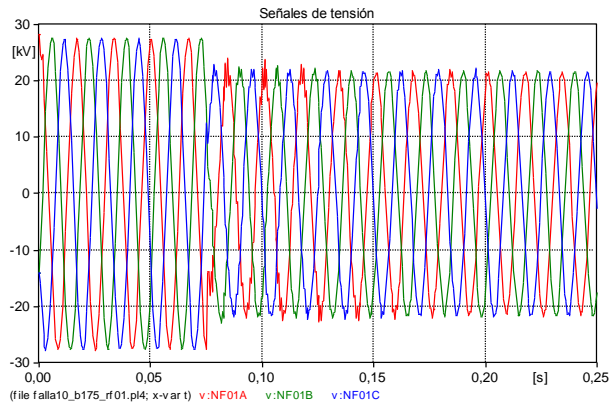


Figura A.2.175. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

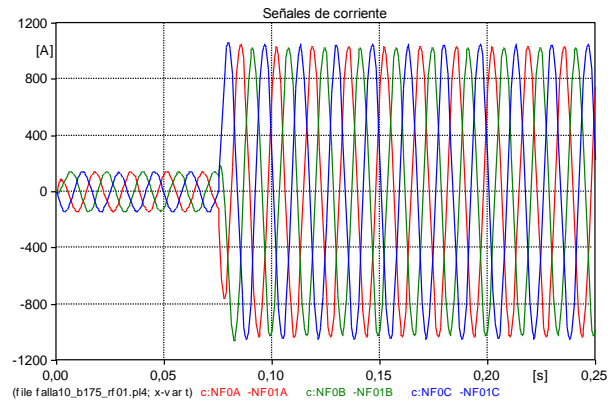


Figura A.2.176. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

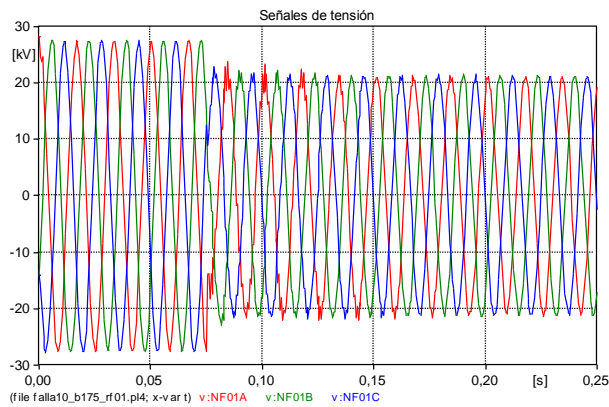


Figura A.2.177. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

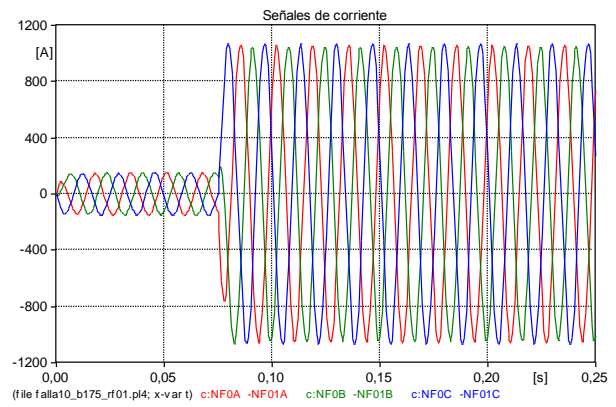


Figura A.2.178. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

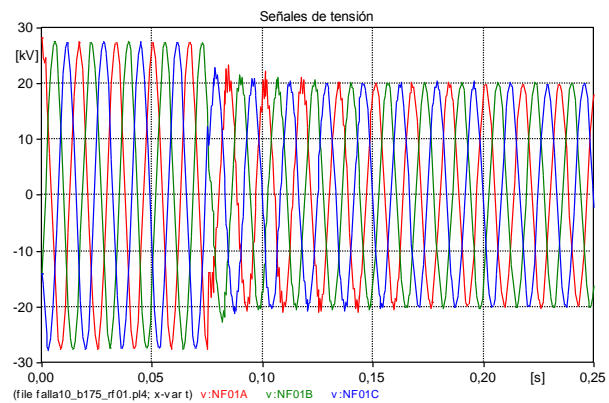


Figura A.2.179. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

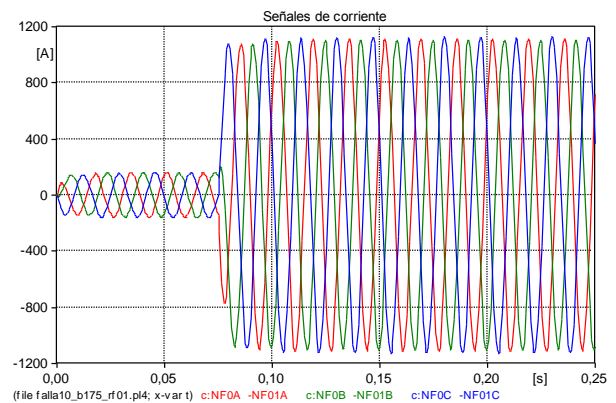


Figura A.2.180. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

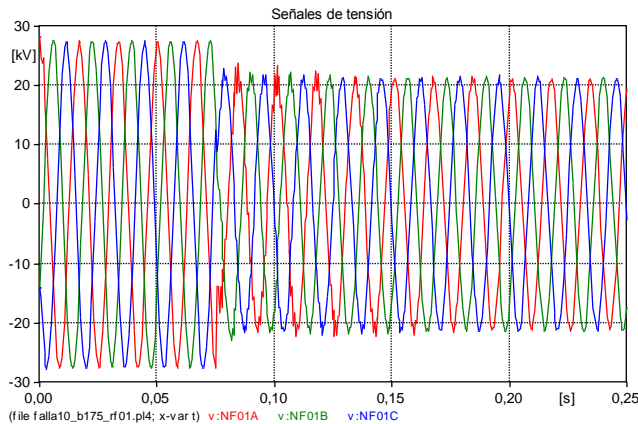


Figura A.2.181. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

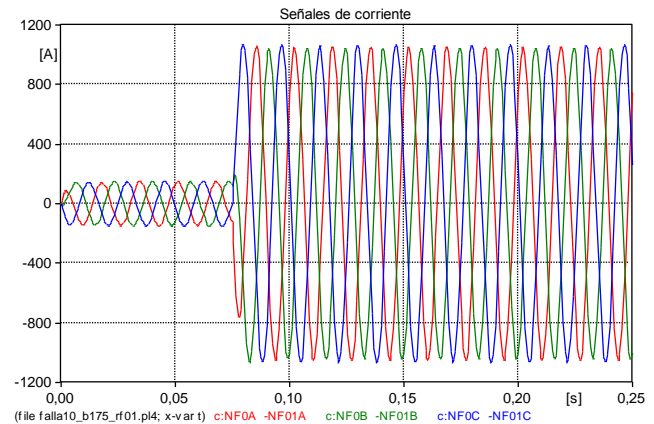


Figura A.2.182. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor cero en la fase C.

Conclusiones: Se presenta el mismo comportamiento para las señales de tensión y corriente en los diferentes modelos de carga.

En todos los casos, después de ocurrida la falla se presenta una distorsión en el voltaje y luego se estabiliza en el valor de falla.

Las señales de tensión y corriente son estables en estado de pre-falla. En estado de falla, el voltaje se estabiliza después de una perturbación debida a la inyección de la falla; y la corriente, aumenta su valor y se estabiliza luego de unos ciclos.

b. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de corriente (I) en valor intermedio positivo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 70.56829$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

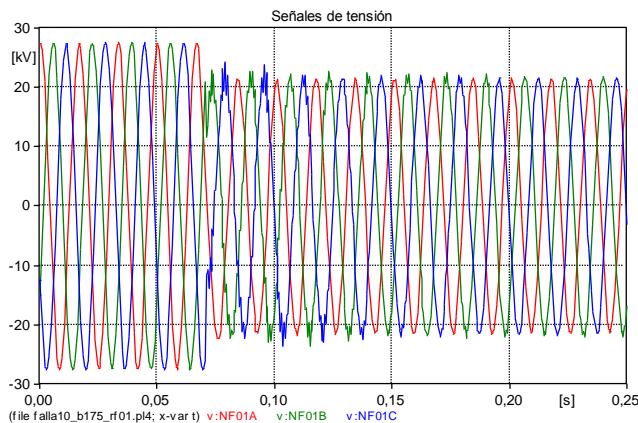


Figura A.2.183. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

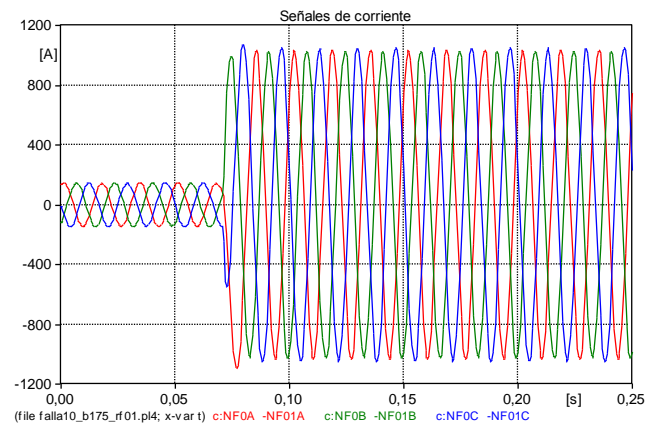


Figura A.2.184. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

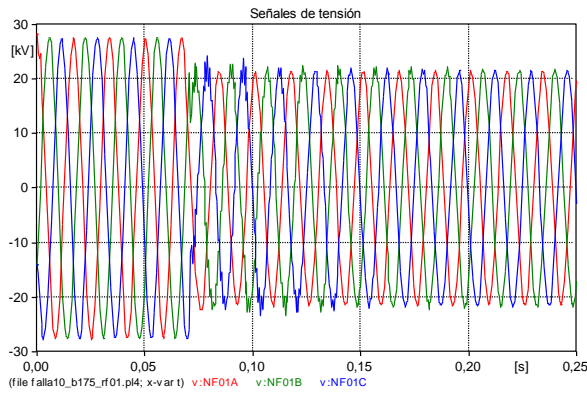


Figura A.2.185. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

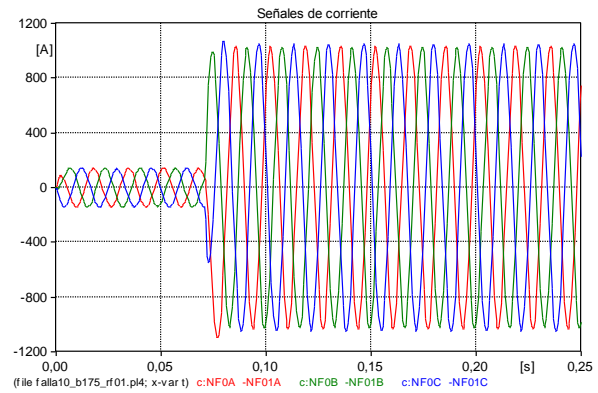


Figura A.2.186. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

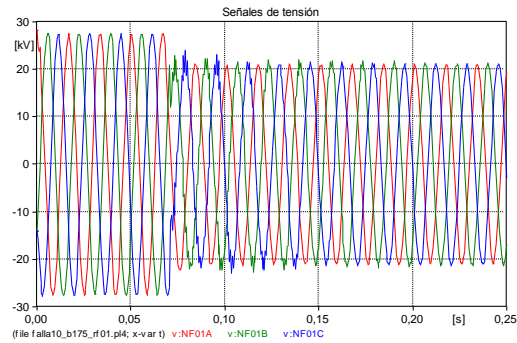


Figura A.2.187. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

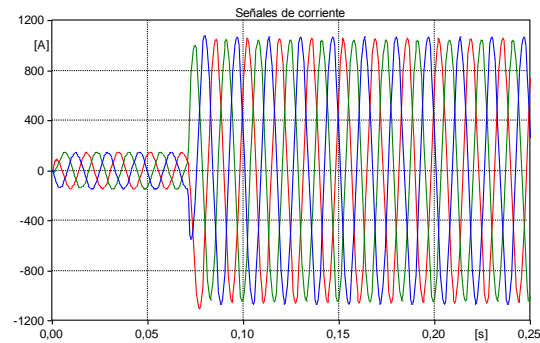


Figura A.2.188. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

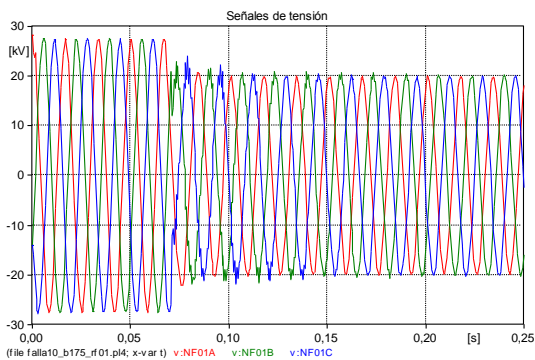


Figura A.2.189. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

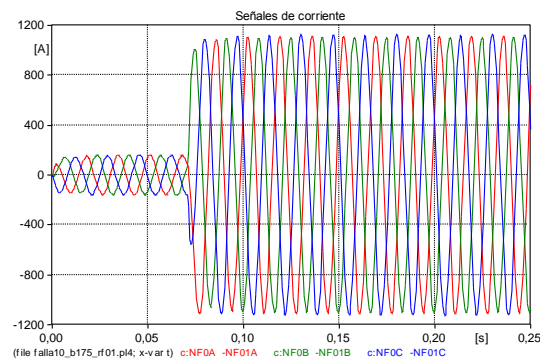


Figura A.2.190. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

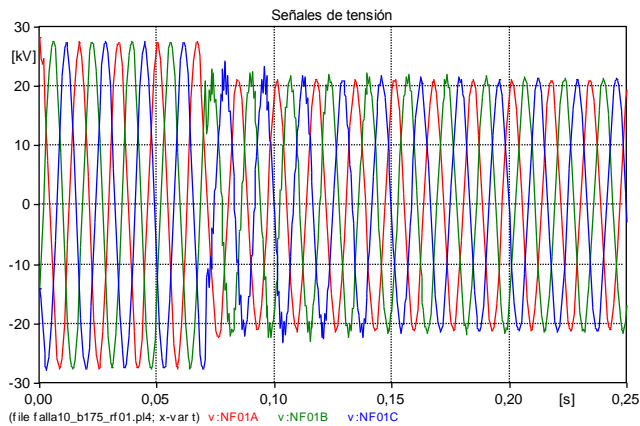


Figura A.2.191. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

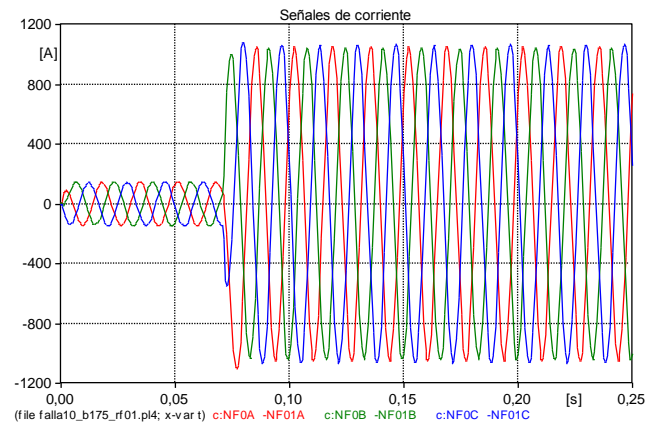


Figura A.2.192. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase A.

Conclusiones: Se nota el mismo comportamiento para todas las señales de tensión y corriente en los diferentes modelos de la carga.

Las señales de tensión presentan una distorsión inicial después de ocurrida la falla, que luego se estabiliza. En pre-falla la señal de tensión no presenta distorsión y es estable.

Las señales de corriente tienen una forma estable para valores de pre-falla y falla, pero en falla la corriente es mayor.

- Para la fase B: ($T_{falla} = 76.1100541$ ms)

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

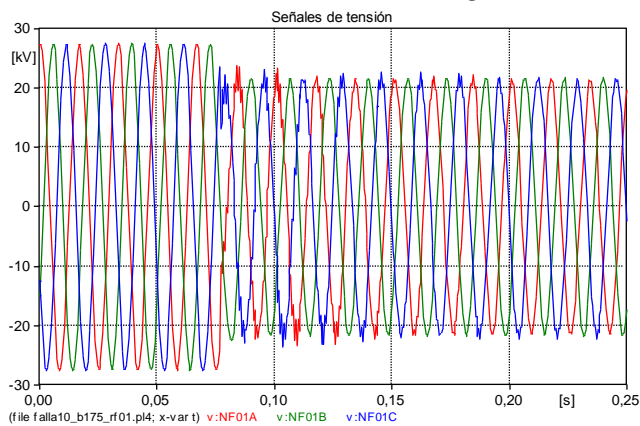


Figura A.2.193. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

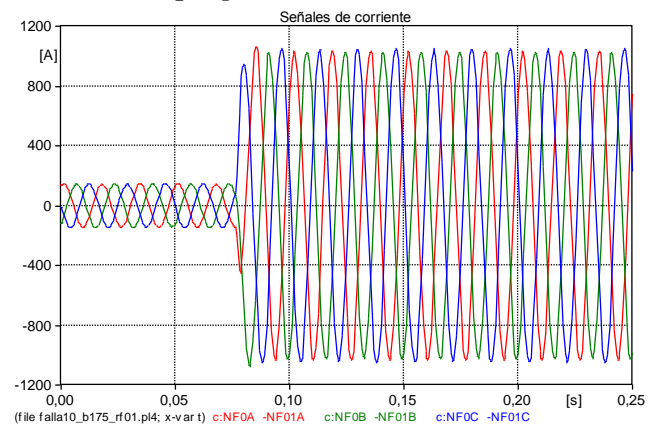


Figura A.2.194. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

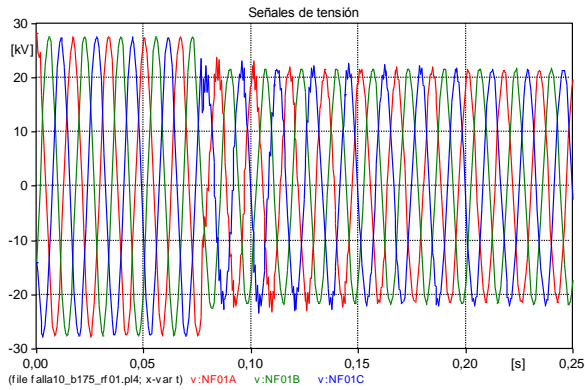


Figura A.2.195. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

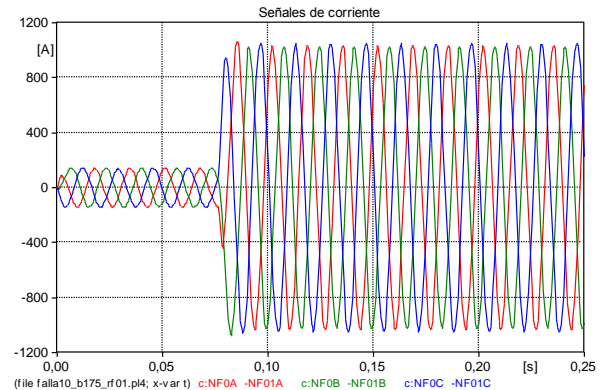


Figura A.2.196. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

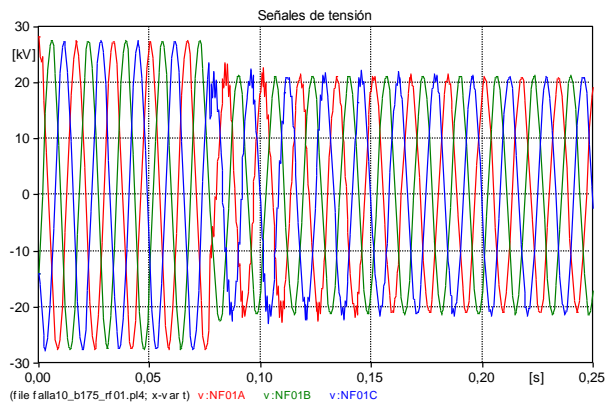


Figura A.2.197. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

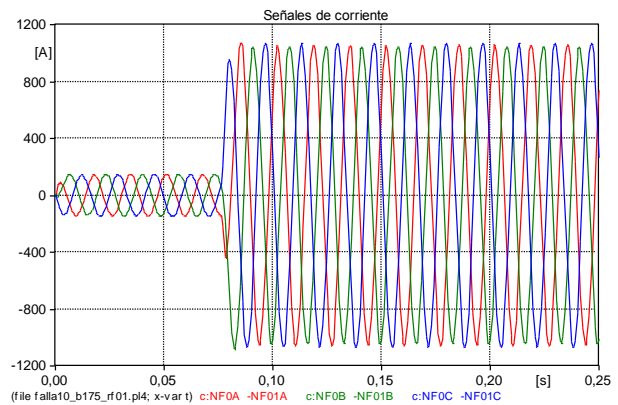


Figura A.2.198. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

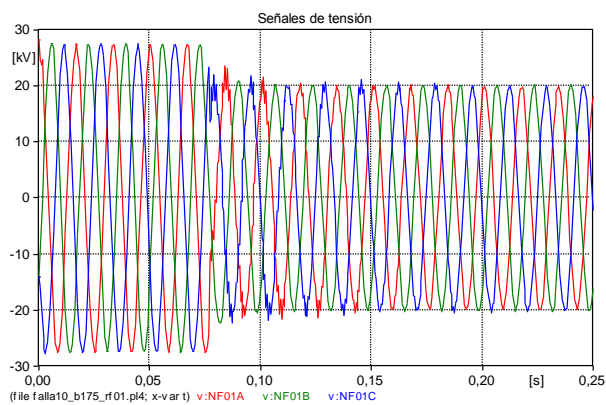


Figura A.2.199. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

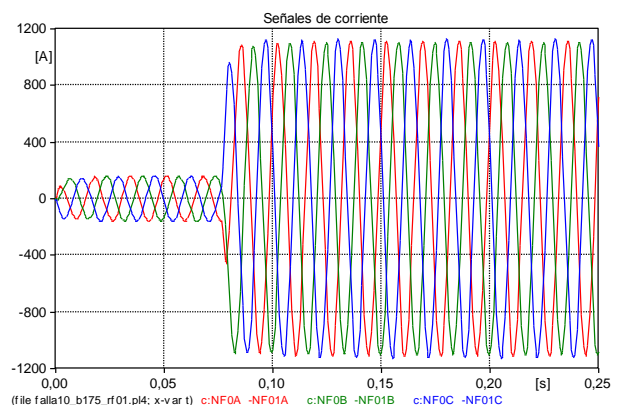


Figura A.2.200. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

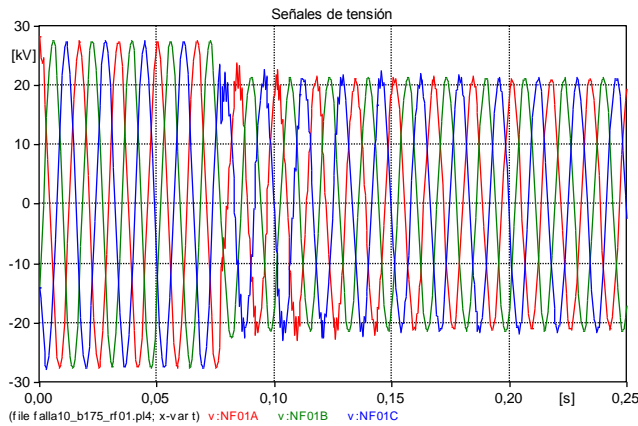


Figura A.2.201. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

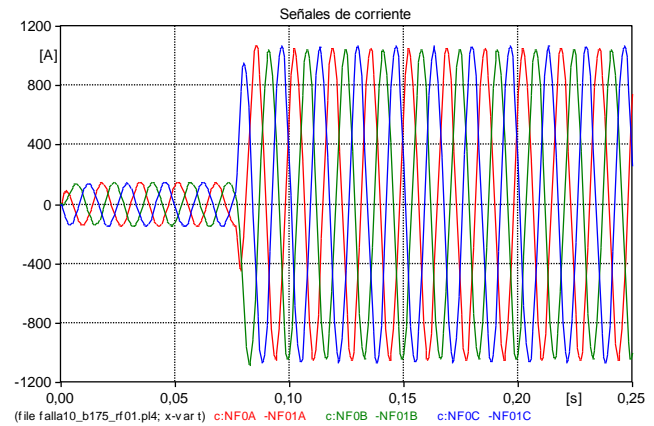


Figura A.2.202. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase B.

Conclusiones: Las señales presentan el mismo comportamiento para los diferentes modelos de la carga.

La inyección de la falla influye en la tensión y la corriente, haciendo que disminuyan y aumenten respectivamente. En el caso de la tensión se observa una distorsión inicial que luego se estabiliza.

La corriente presenta valores estables en pre-falla y en estado de falla, aunque en falla la señal tiene un valor mayor.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 81.668265$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que poseen el ATP (Caso base).*

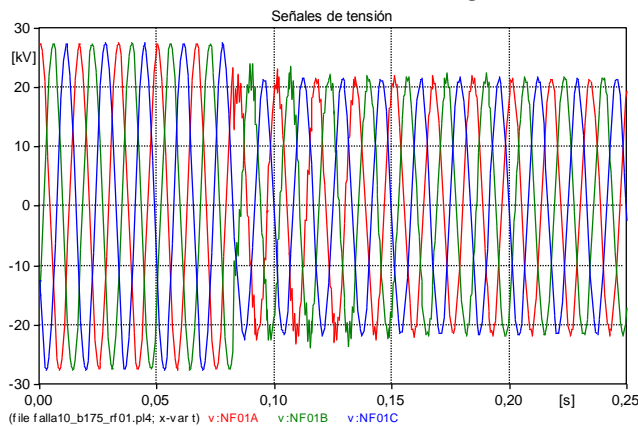


Figura A.2.203. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

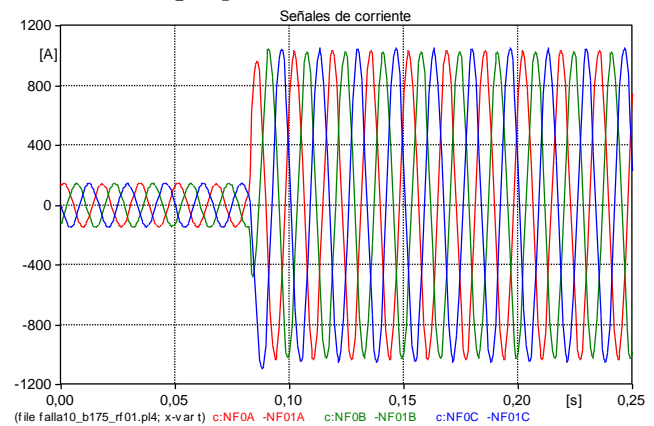


Figura A.2.204. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

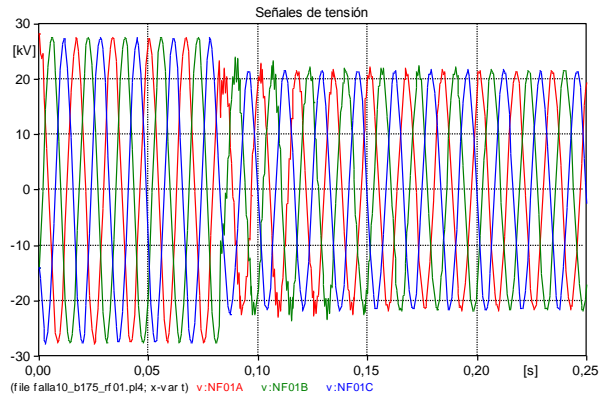


Figura A.2.205. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

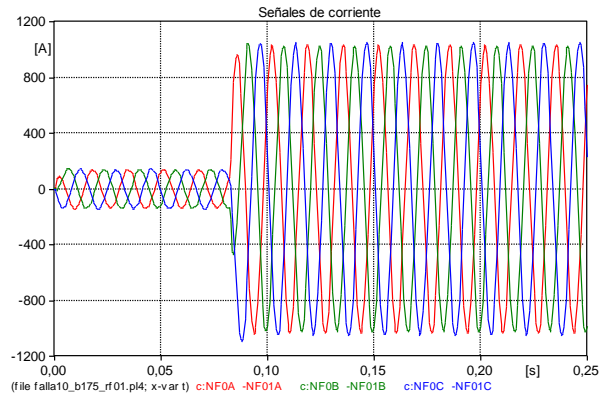


Figura A.2.206. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

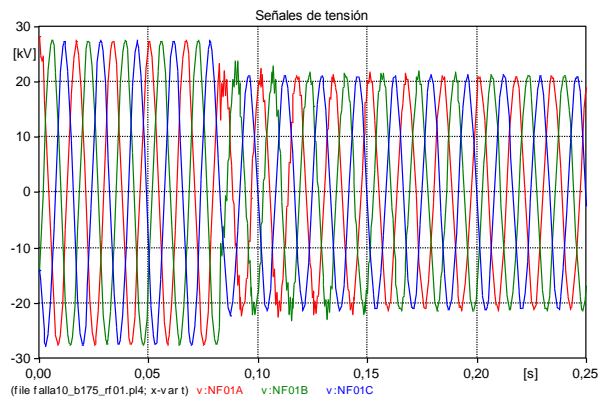


Figura A.2.207. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

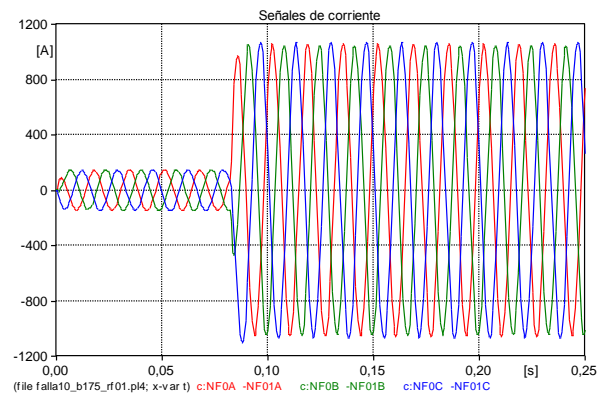


Figura A.2.208. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

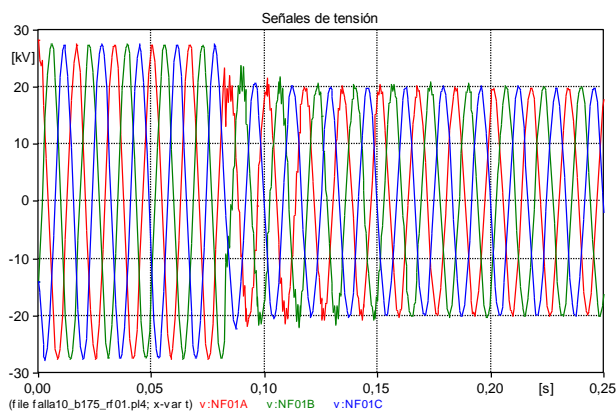


Figura A.2.209. Seales de Tensión con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

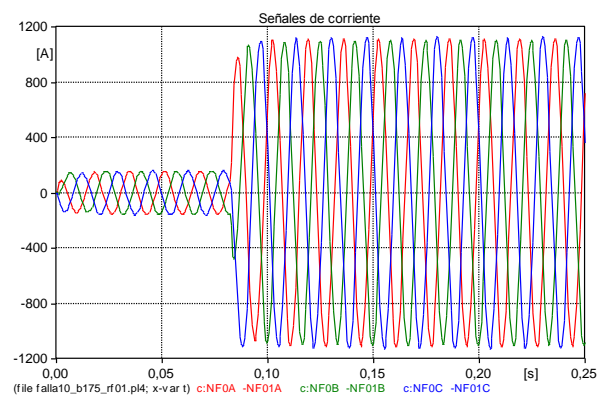


Figura A.2.210. Seales de corriente con inepción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

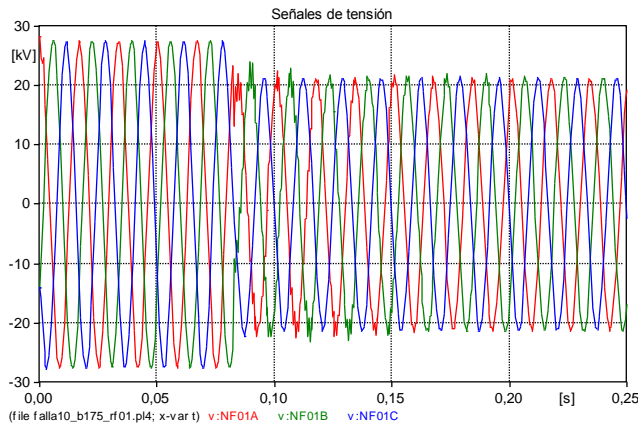


Figura A.2.211. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

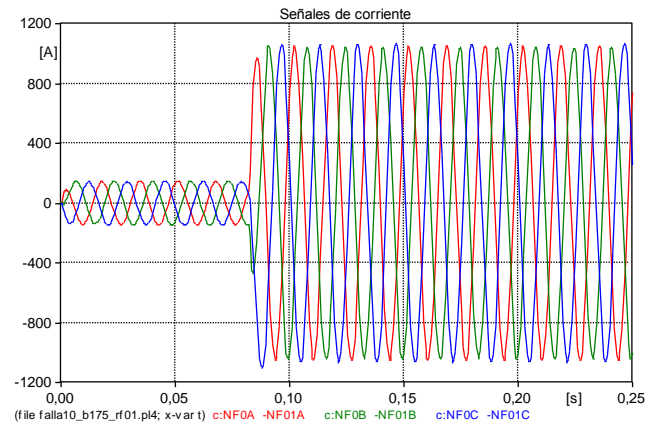


Figura A.2.212. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio positivo en la fase C.

Conclusiones: El comportamiento de las señales de tensión y corriente es el mismo para los diferentes modelos de la carga.

En estado de pre-falla las señales de tensión son estables y no presentan distorsión, del mismo modo ocurre con las corrientes. En estado de falla, inicialmente para la tensión se presenta una distorsión que luego se estabiliza, y para la corriente se nota un aumento, pero se estabiliza.

c. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de corriente (I) en valor máximo positivo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 67.79051$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

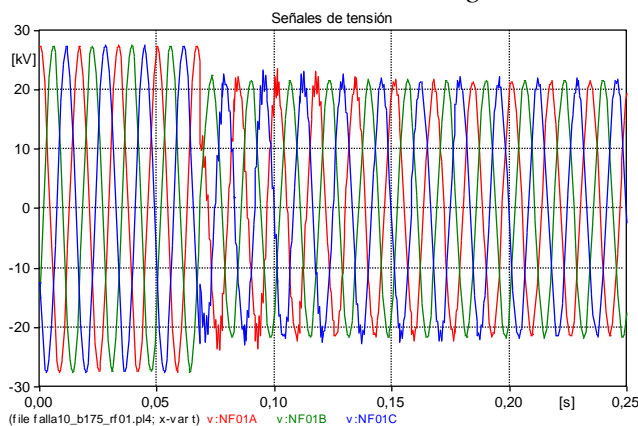


Figura A.2.213. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

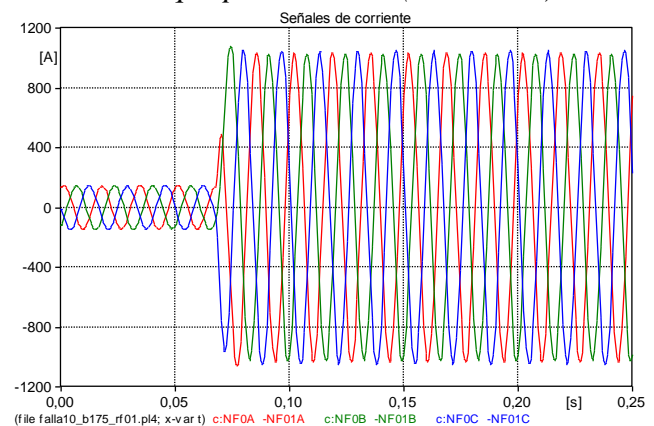


Figura A.2.214. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

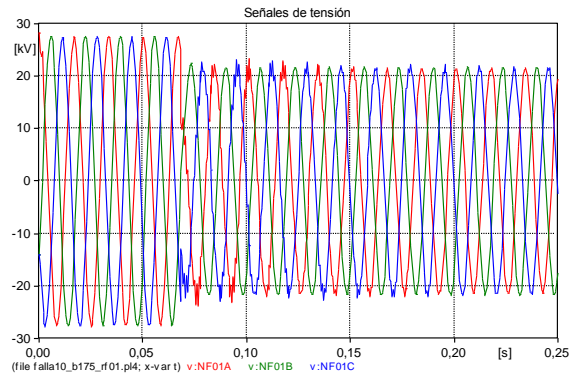


Figura A.2.215. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

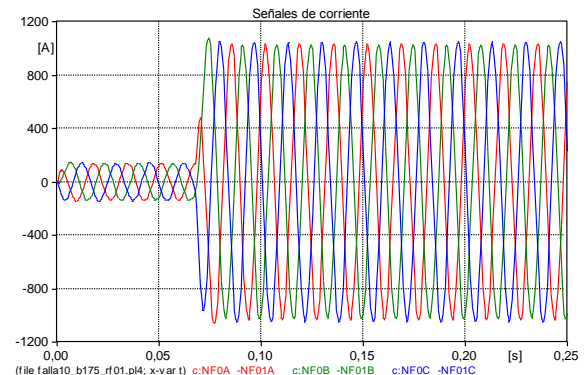


Figura A.2.216. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

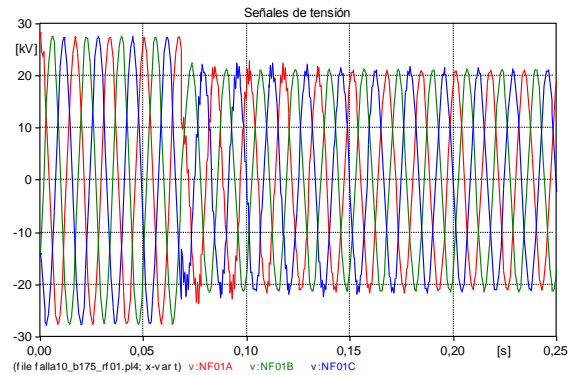


Figura A.2.217. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

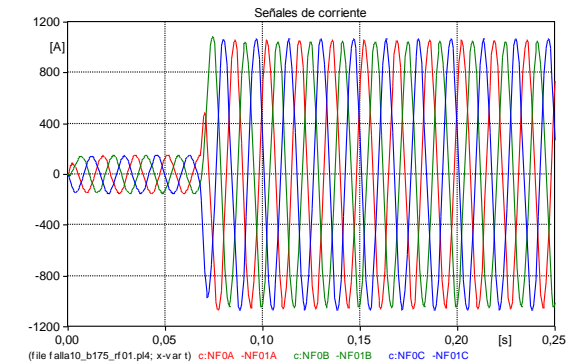


Figura A.2.218. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

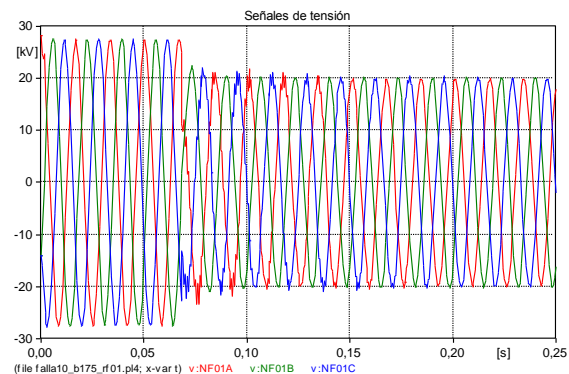


Figura A.2.219. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

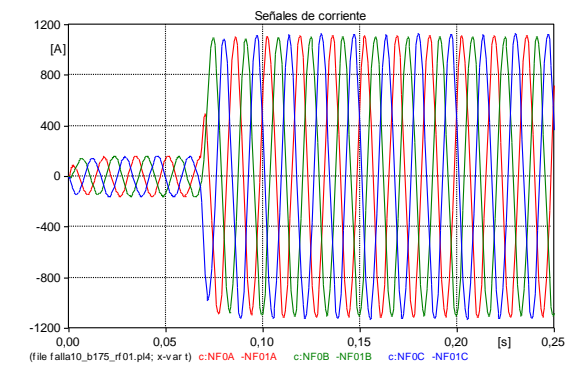


Figura A.2.220. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

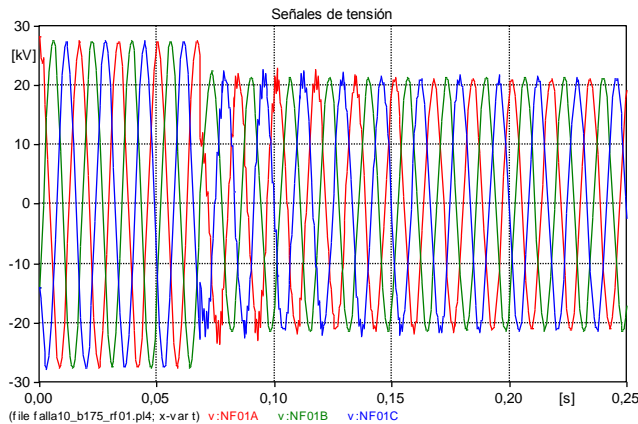


Figura A.2.221. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

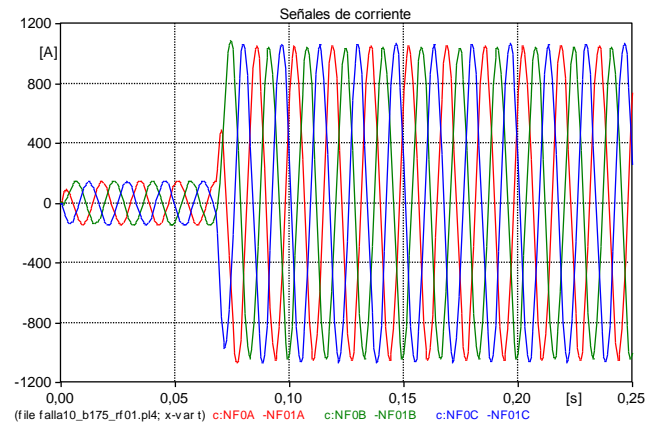


Figura A.2.222. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase A.

Conclusiones: El comportamiento de las señales es el mismo para el caso base y para los modelos de la carga programados.

No se presentan oscilaciones numéricas debidas al modelo de la carga. Las señales de tensión y corriente son estables en estado de pre-falla. En estado de falla, la tensión disminuye y presenta una distorsión inicial que luego se estabiliza, mientras que la corriente aumenta y se estabiliza unos ciclos después.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 73.33228$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

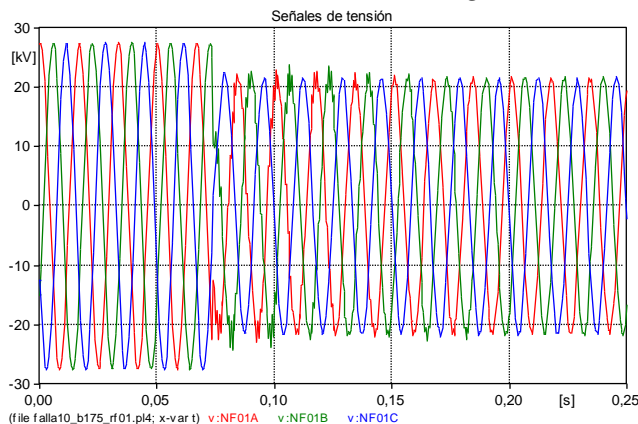


Figura A.2.223. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

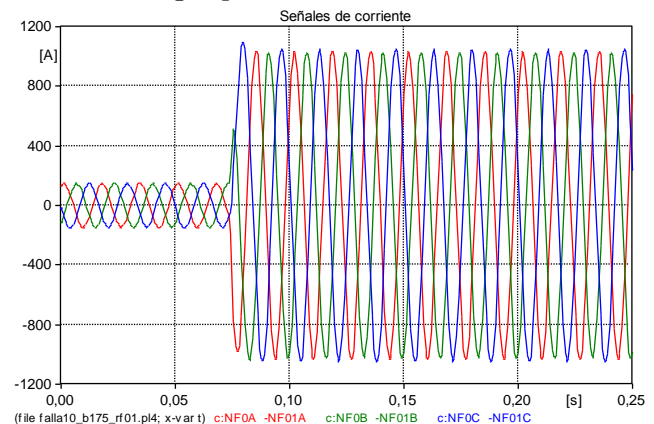


Figura A.2.224. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

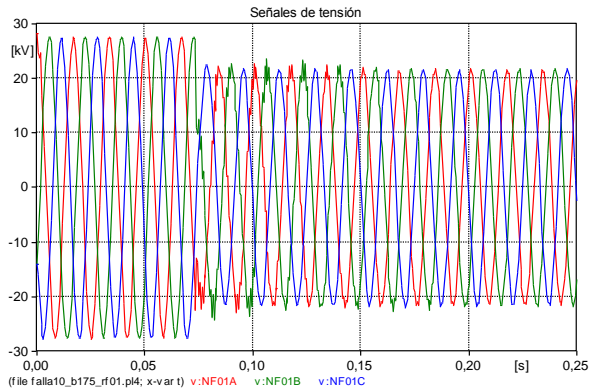


Figura A.2.225. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

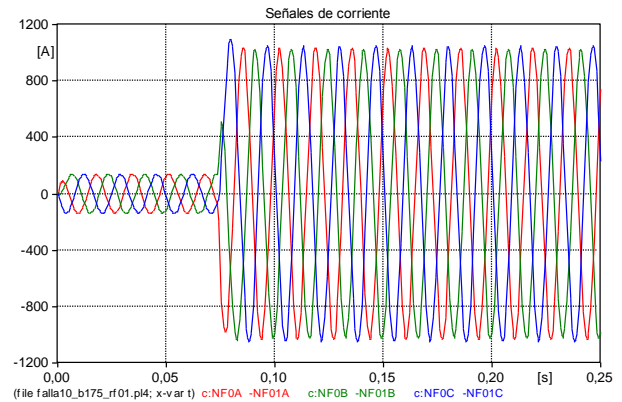


Figura A.2.226. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

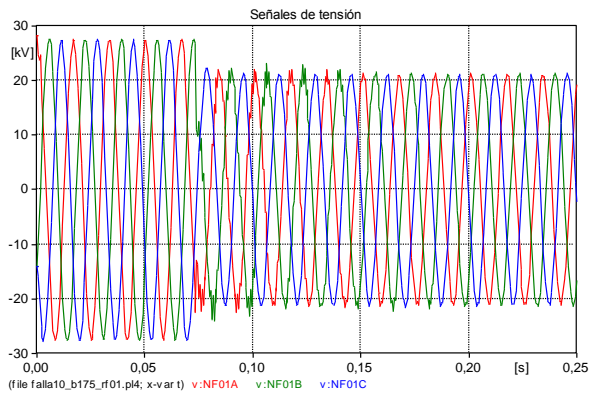


Figura A.2.227. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

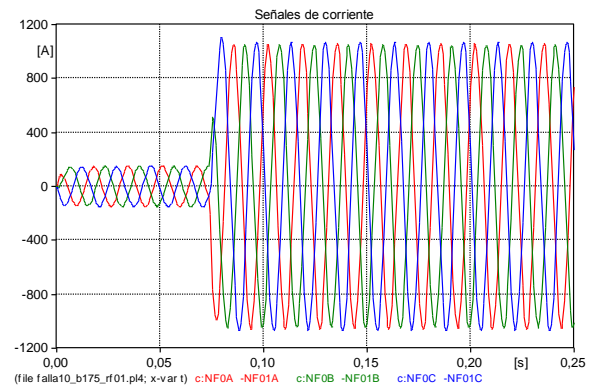


Figura A.2.228. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

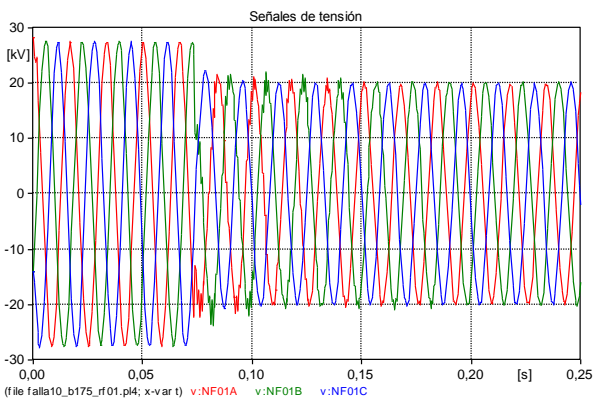


Figura A.2.229. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

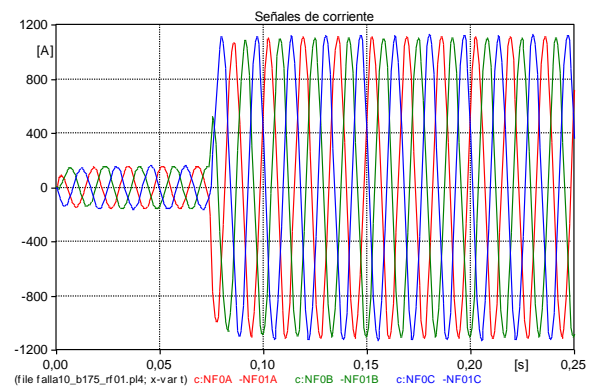


Figura A.2.230. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

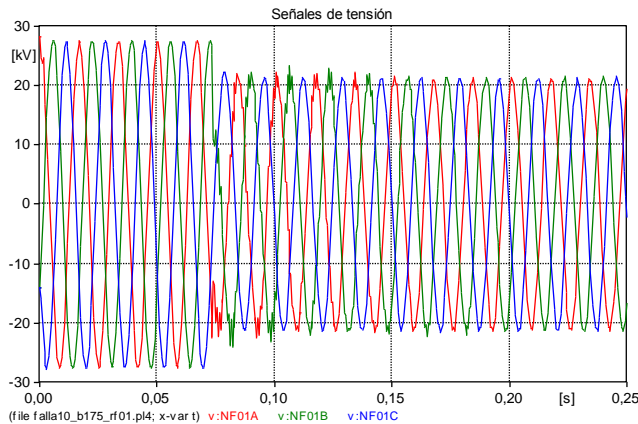


Figura A.2.231. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

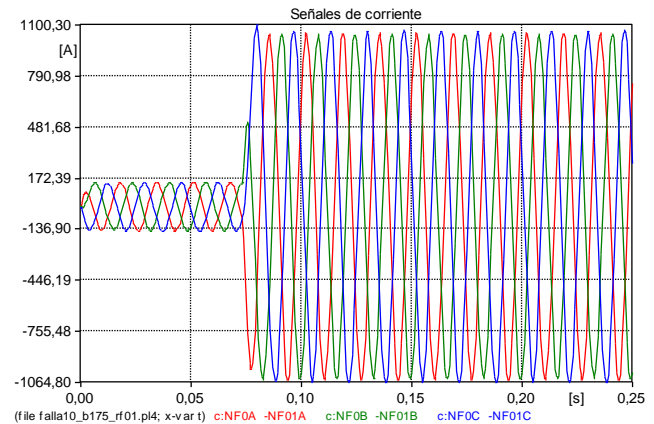


Figura A.2.232. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase B.

Conclusiones: Se presenta el mismo comportamiento en las señales de tensión y corriente en todos los casos de modelo de la carga analizados.

Las señales de tensión en estado de pre-falla presentan un comportamiento estable y sin oscilaciones, después de ocurrida la falla, inicialmente presenta una leve oscilación o distorsión que se estabiliza al final del estado de falla.

Las señales de corriente no presentan oscilaciones numéricas en pre-falla y en falla, aunque en estado de falla con mucho mayores que en pre-falla.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 78.89049$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

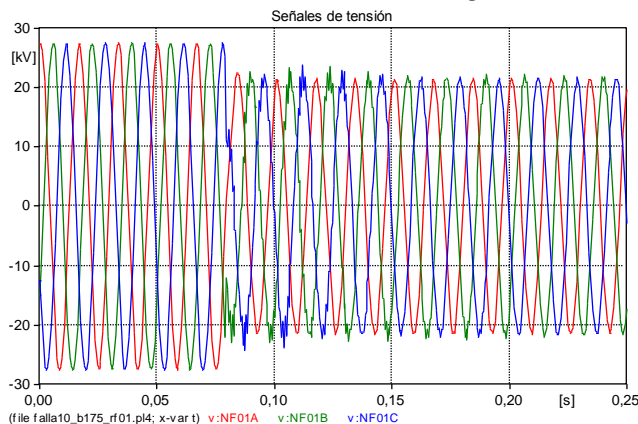


Figura A.2.233. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

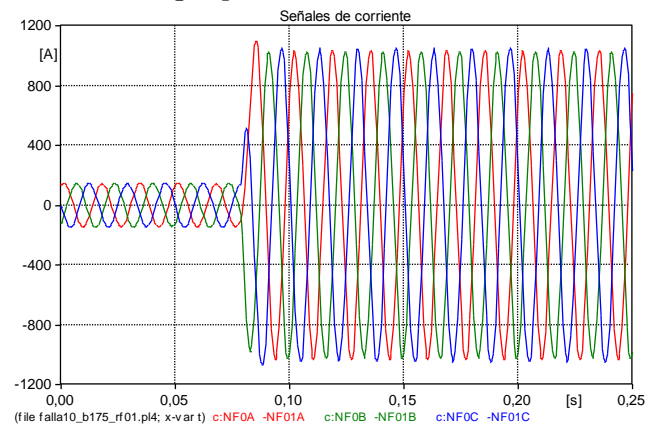


Figura A.2.234. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

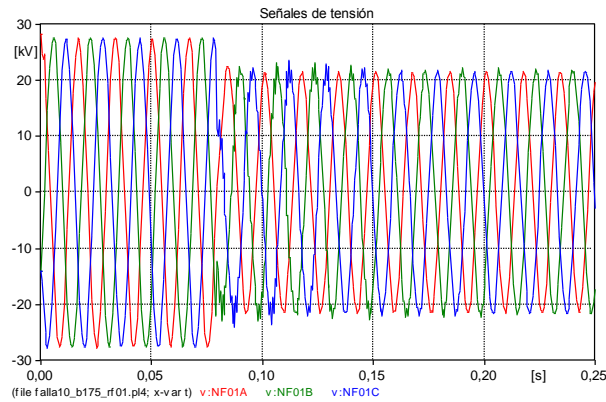


Figura A.2.235. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

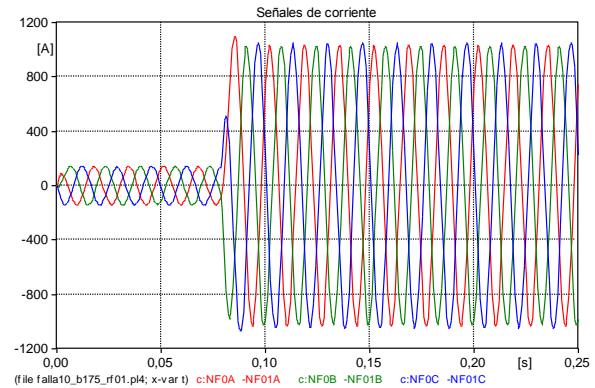


Figura A.2.236. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

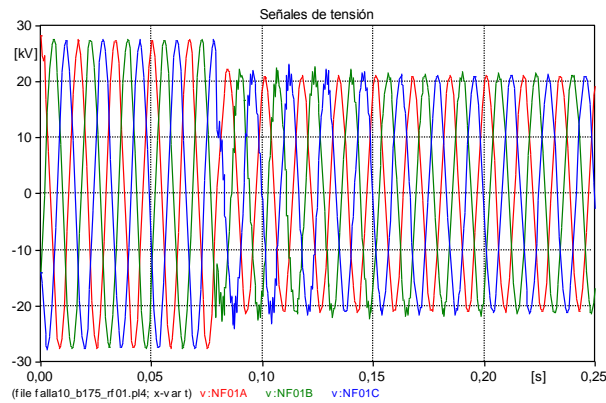


Figura A.2.237. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

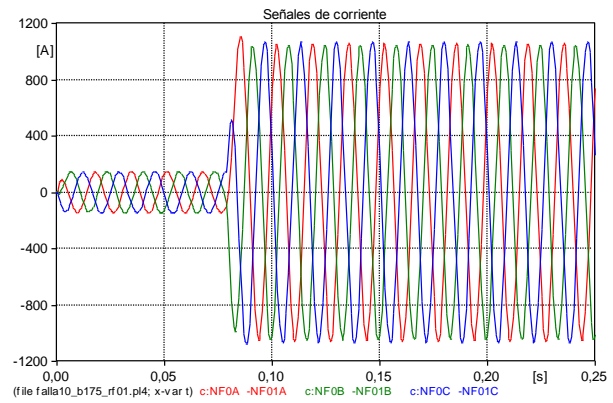


Figura A.2.238. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

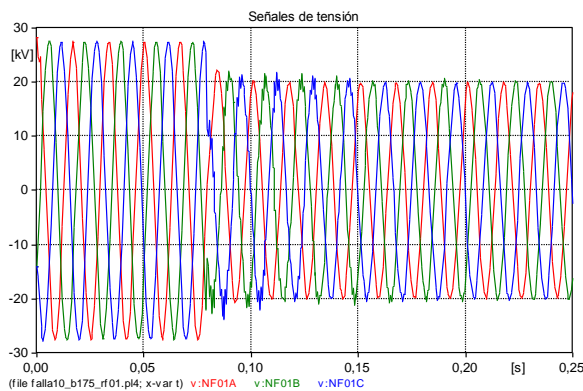


Figura A.2.239. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

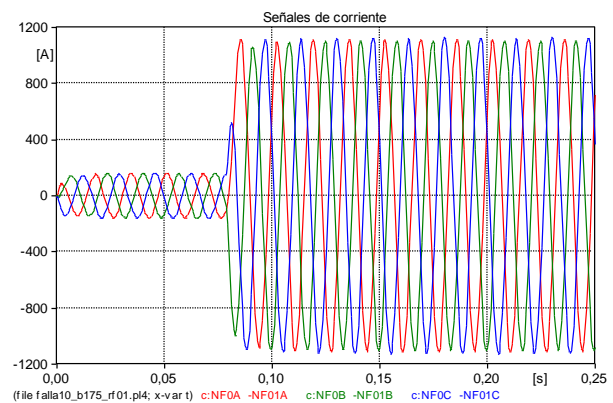


Figura A.2.240. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

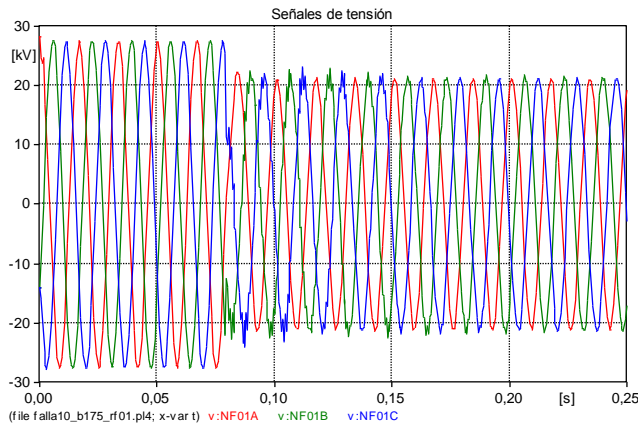


Figura A.2.241. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

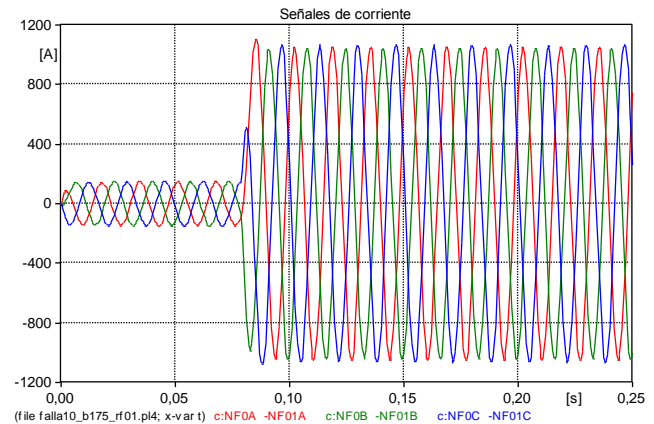


Figura A.2.242. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo positivo en la fase C.

Conclusiones: Las señales presentan el mismo comportamiento en el estado de pre-falla y en el estado de falla para los diferentes modelos de la carga.

La señal de tensión, después de ocurrida la falla presenta una distorsión inicial que luego se estabiliza en todos los modelos de la carga ensayados.

La señal de corriente no presenta oscilaciones numéricas en ningún estado (pre-falla y falla).

d. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de corriente (I) en valor intermedio negativo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 62.23496$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

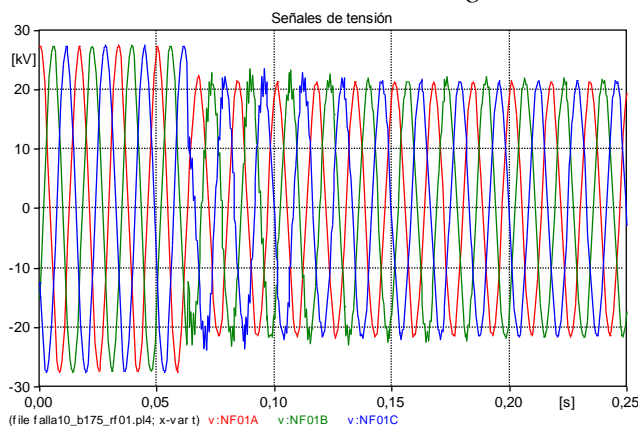


Figura A.2.243. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

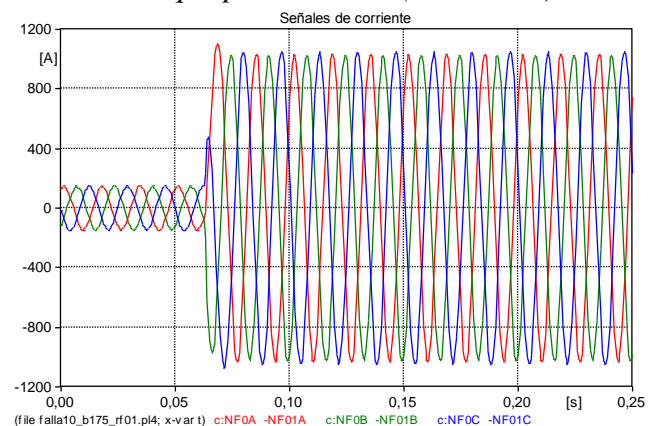


Figura A.2.244. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

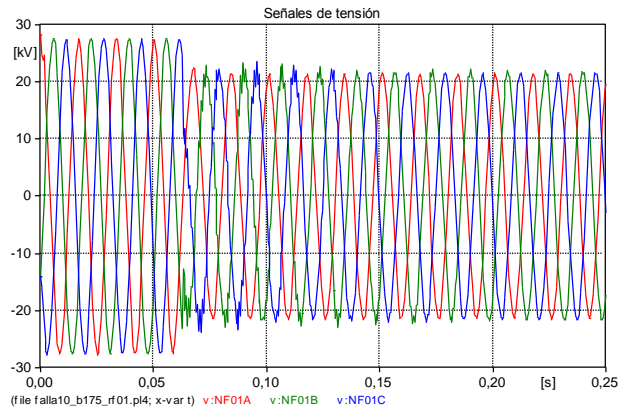


Figura A.2.245. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

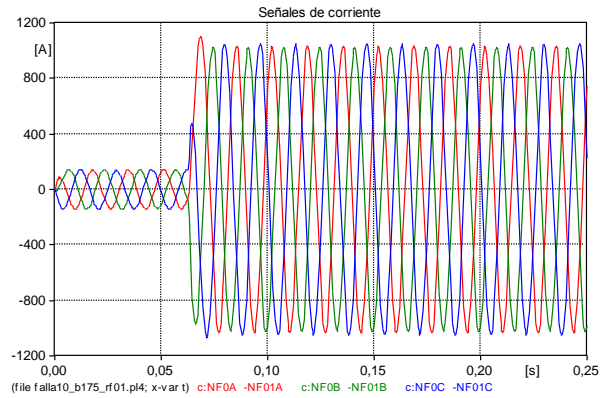


Figura A.2.246. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

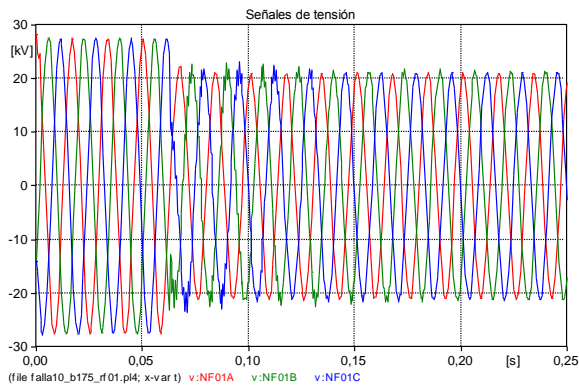


Figura A.2.247. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

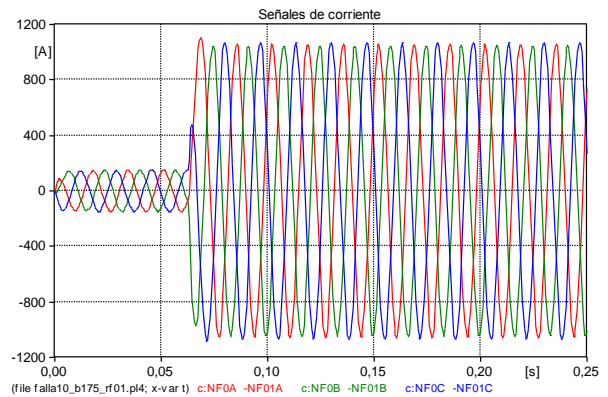


Figura A.2.248. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

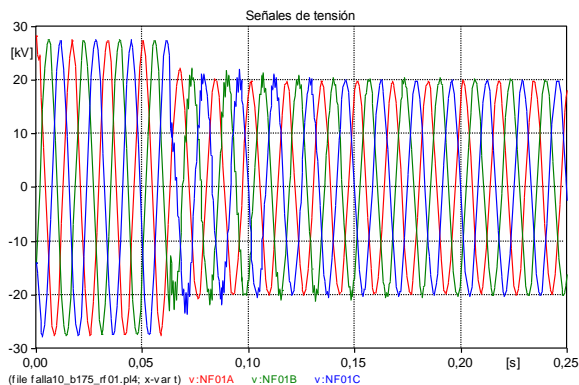


Figura A.2.249. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

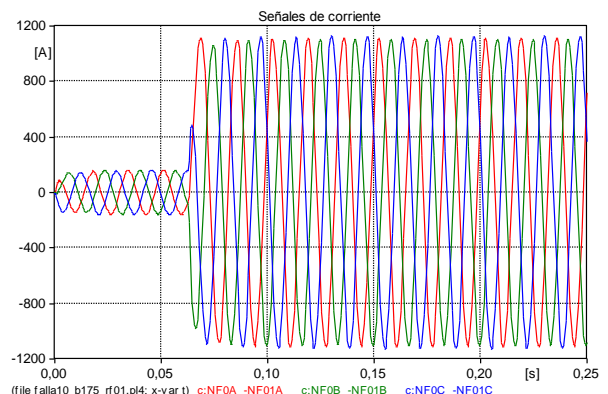


Figura A.2.250. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

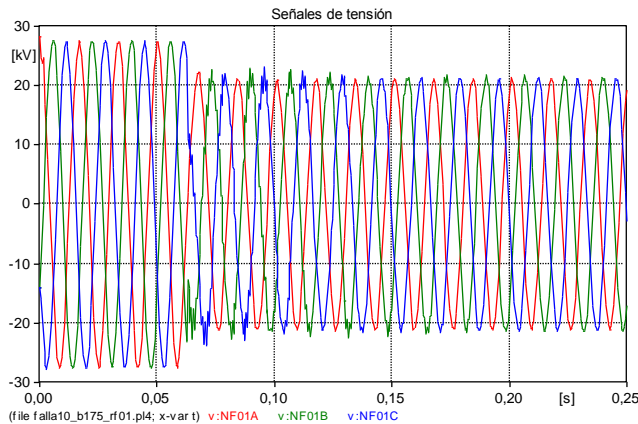


Figura A.2.251. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

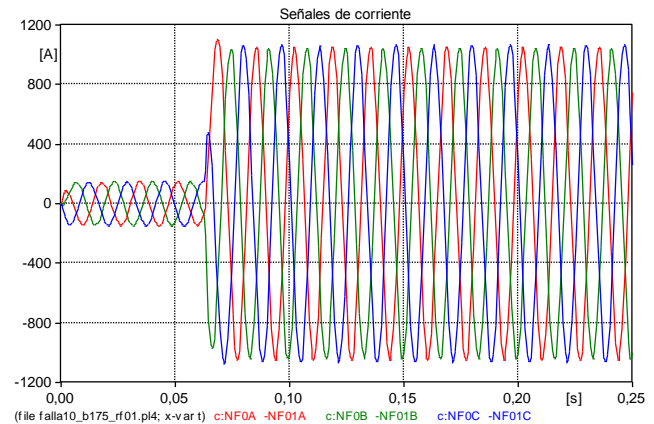


Figura A.2.252. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase A.

Conclusiones: Las señales de tensión y de corriente presentan el mismo comportamiento en todos los casos del modelo de la carga analizado.

No se presentan oscilaciones numéricas debidas al modelo de la carga, aunque la tensión presenta una distorsión en la señal después de ocurrida la falla que luego se estabiliza. Lo anterior ocurre en todos los casos del modelo de la carga.

La corriente es estable en estado de pre-falla y de falla, aunque en falla los valores son mayores.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 67.77672$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

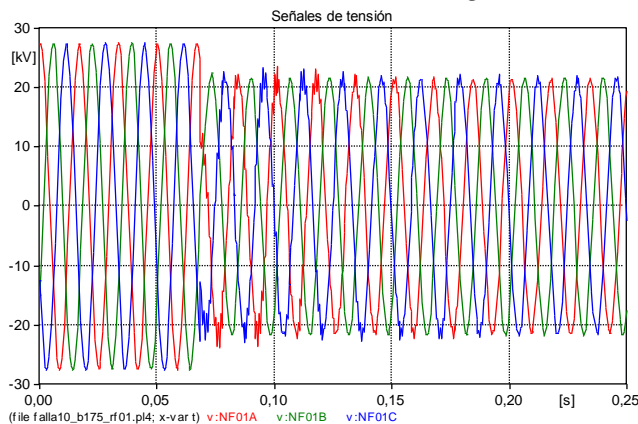


Figura A.2.253. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

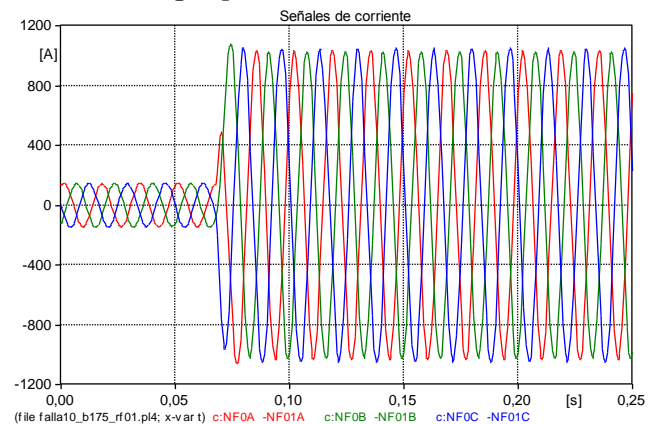


Figura A.2.254. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

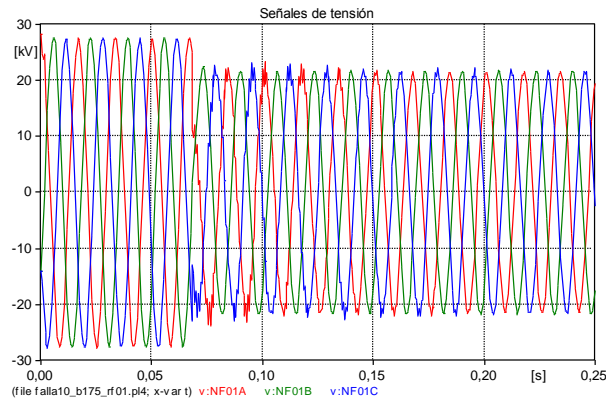


Figura A.2.255. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

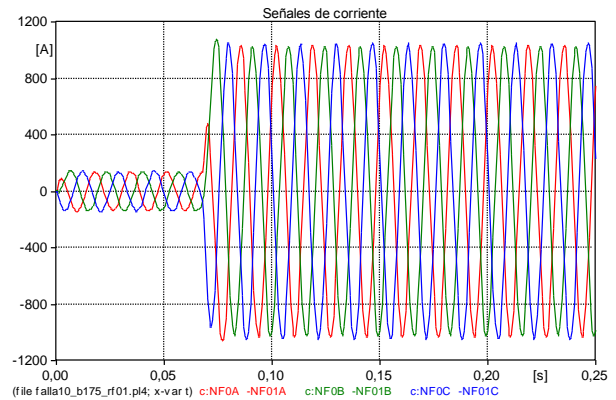


Figura A.2.256. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

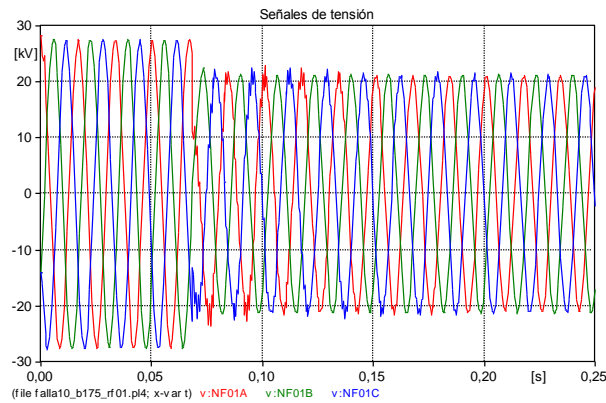


Figura A.2.257. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

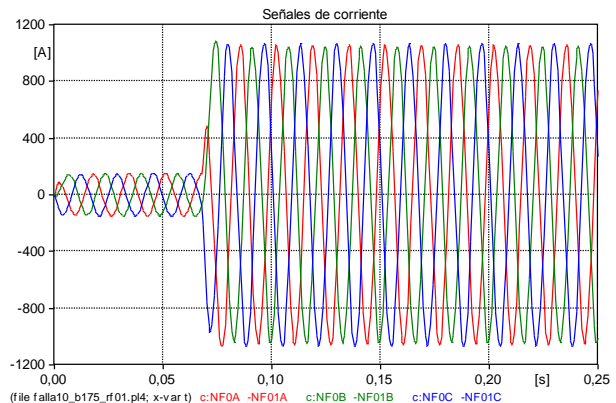


Figura A.2.258. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

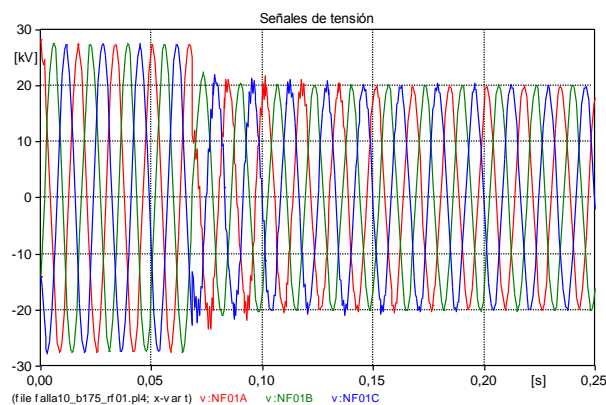


Figura A.2.259. Seales de Tensión con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

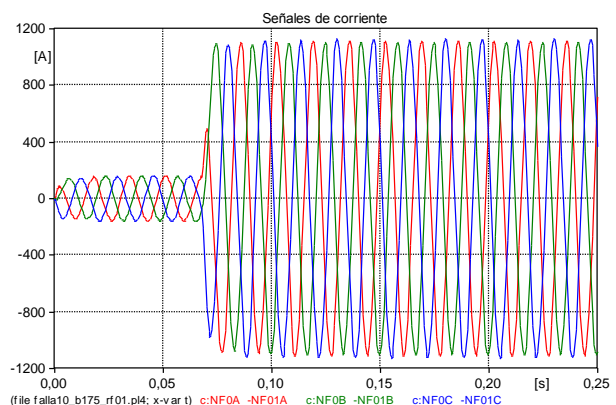


Figura A.2.260. Seales de corriente con inecpción de falla teniendo en cuenta la seál (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

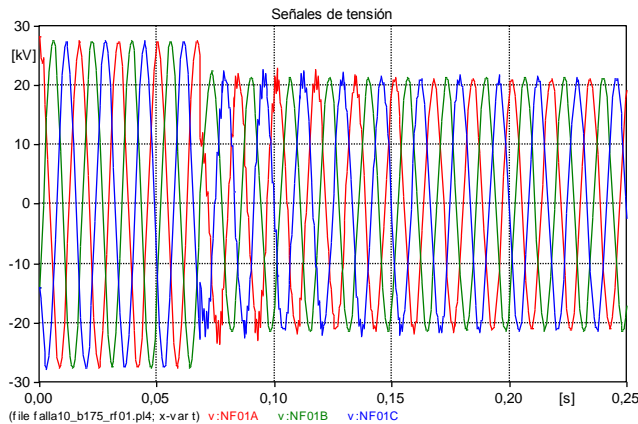


Figura A.2.261. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

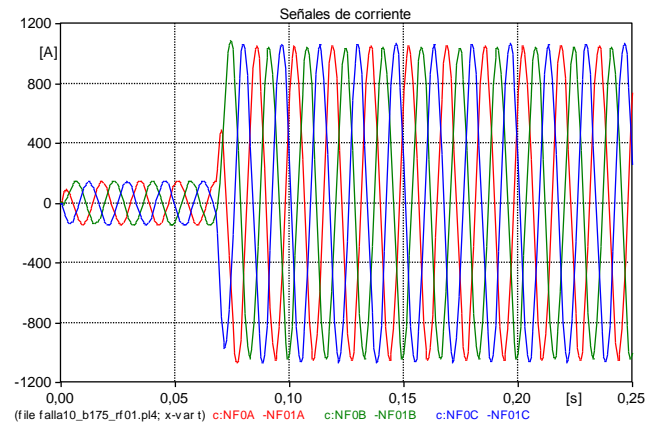


Figura A.2.262. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase B.

Conclusiones: El comportamiento de las señales es el mismo para el caso base y para los modelos de la carga programados.

No se presentan oscilaciones numéricas debidas al modelo de la carga. Las señales de tensión y corriente son estables en estado de pre-falla. En estado de falla, la tensión disminuye y presenta una distorsión inicial que luego se estabiliza, mientras que la corriente aumenta y se estabiliza.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 73.334932$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

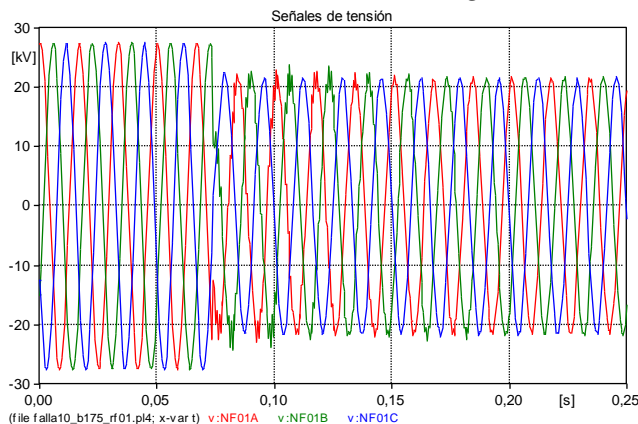


Figura A.2.263. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

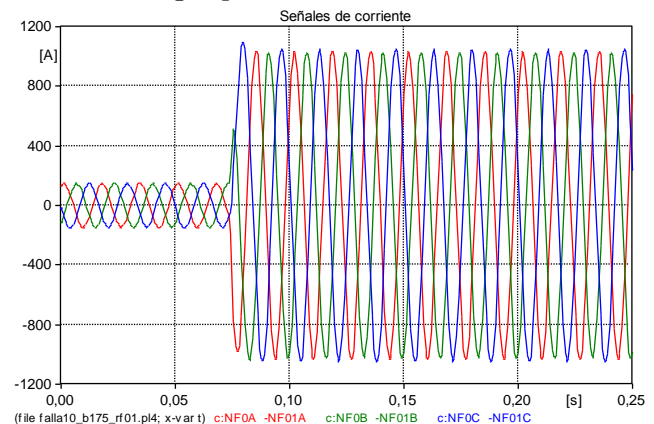


Figura A.2.264. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

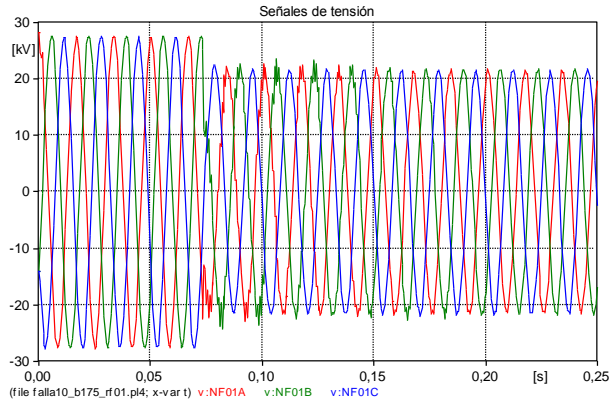


Figura A.2.265. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

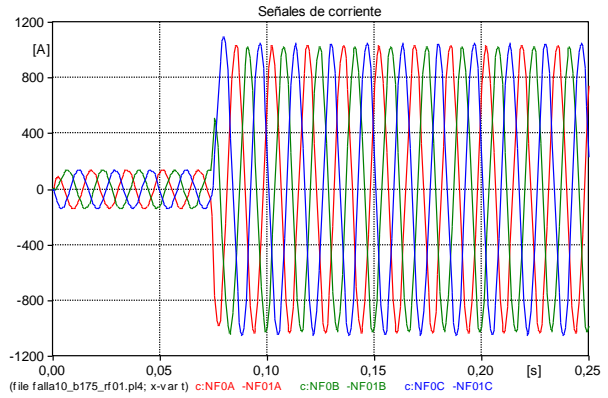


Figura A.2.266. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

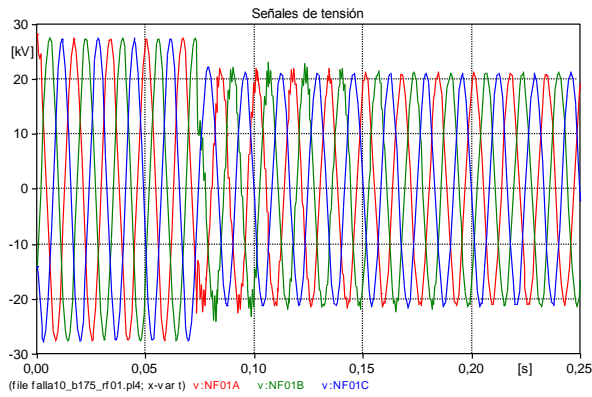


Figura A.2.267. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

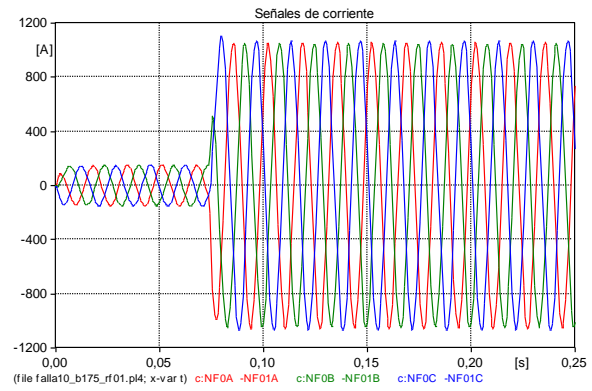


Figura A.2.268. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

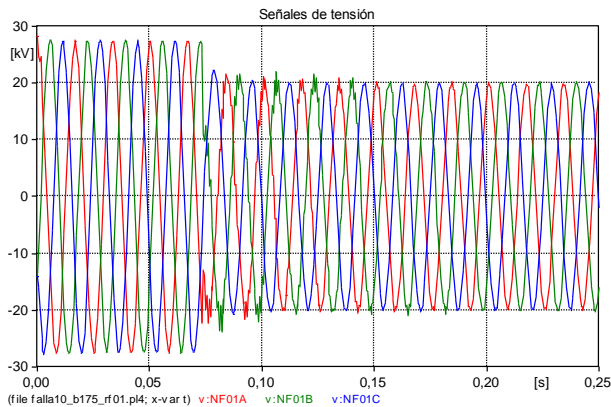


Figura A.2.269. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

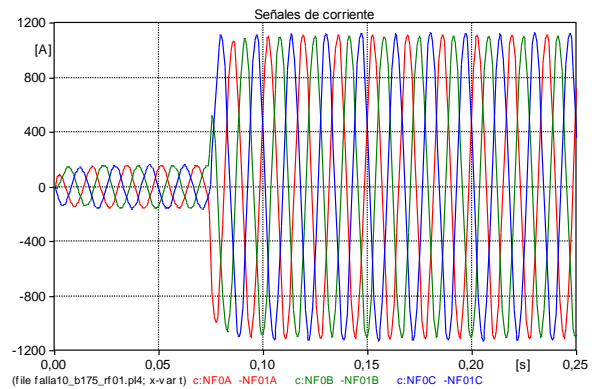


Figura A.2.270. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

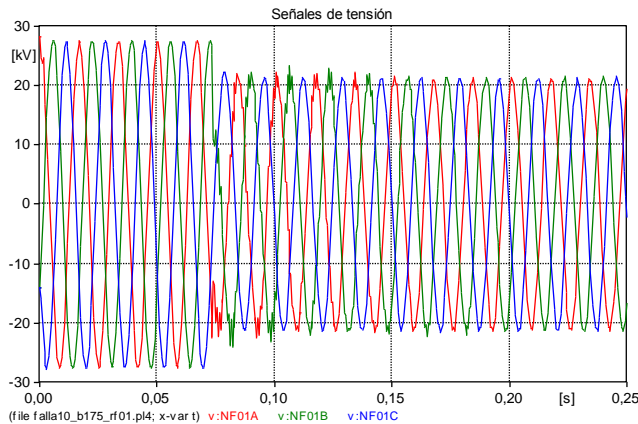


Figura A.2.271. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

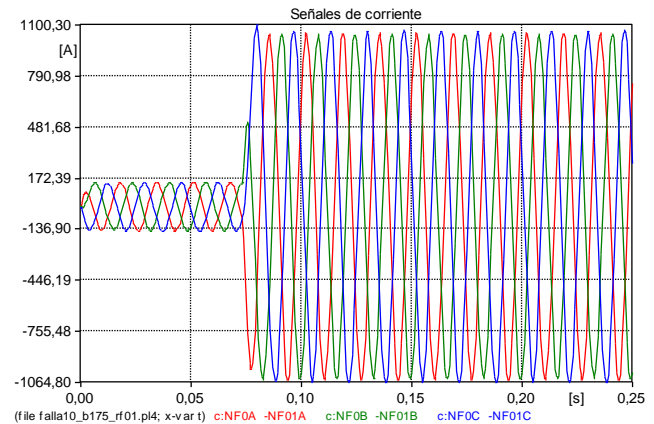


Figura A.2.272. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor intermedio negativo en la fase C.

Conclusiones: Se presenta el mismo comportamiento en las señales de tensión y corriente en todos los casos de modelo de la carga analizados.

Las señales de tensión en estado de pre-falla presentan un comportamiento estable y sin oscilaciones, después de ocurrida la falla, inicialmente presenta una leve oscilación o distorsión que se estabiliza al final del estado de falla.

Las señales de corriente no presentan oscilaciones numéricas en pre-falla y en falla, aunque en estado de falla son mucho mayores que en pre-falla.

e. Inyección de la falla teniendo en cuenta la señal de corriente (I) en valor máximo negativo.

- **Para la fase A: ($T_{falla} = 76,124$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que posee el ATP (Caso base).*

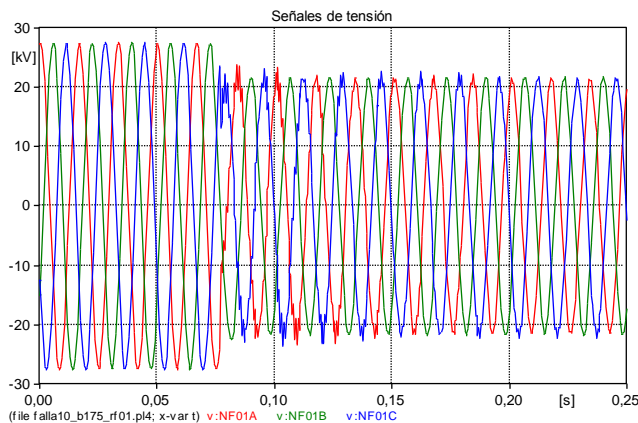


Figura A.2.273. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

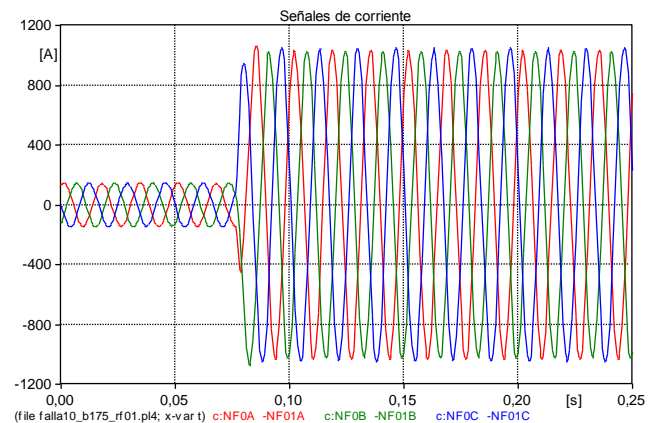


Figura A.2.274. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Zcte.*

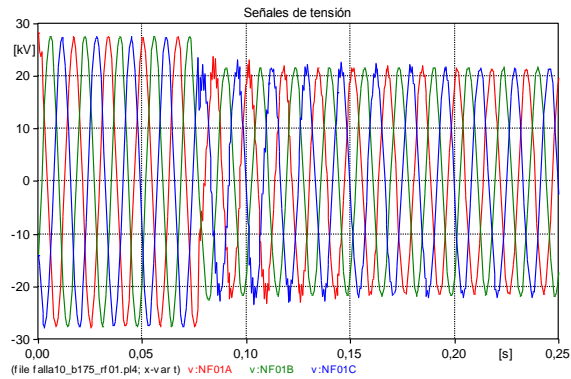


Figura A.2.275. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

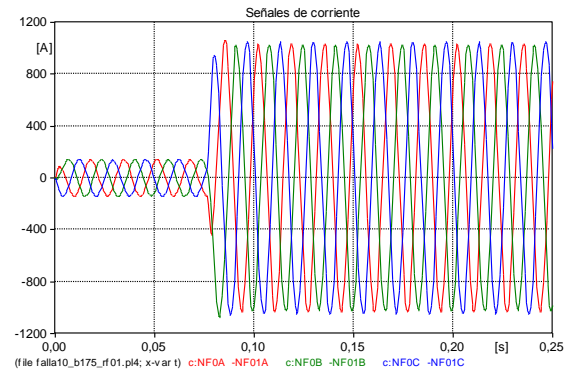


Figura A.2.276. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

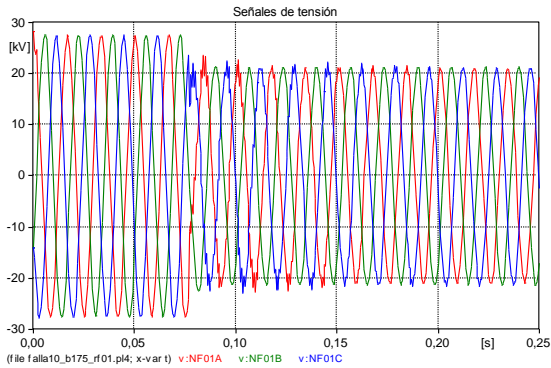


Figura A.2.277. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

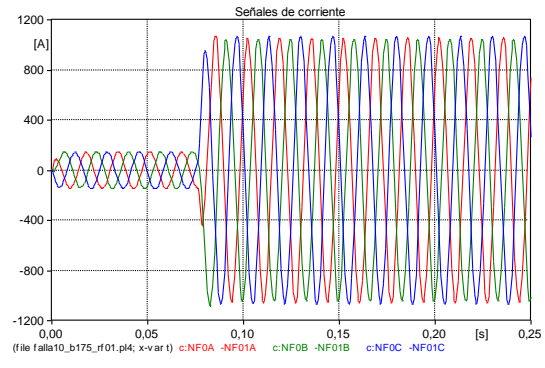


Figura A.2.278. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

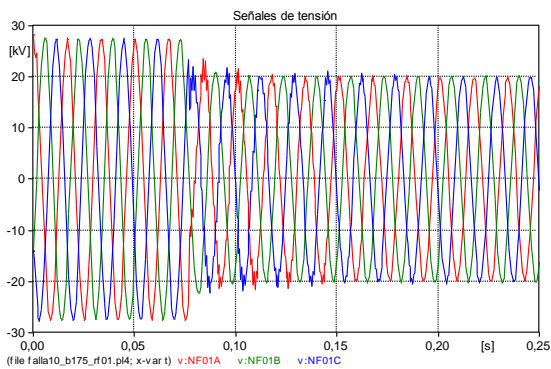


Figura A.2.279. Seales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

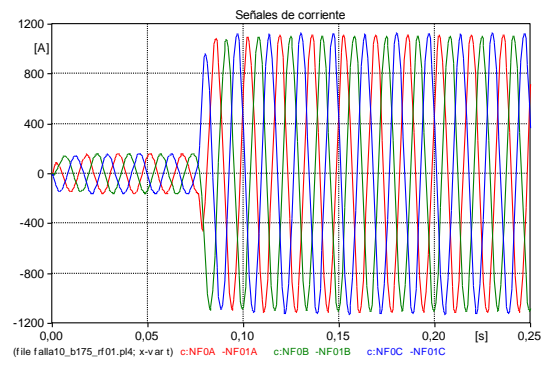


Figura A.2.280. Seales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

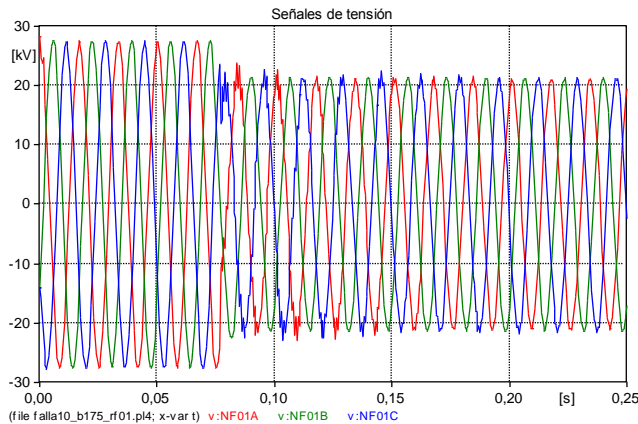


Figura A.2.281. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

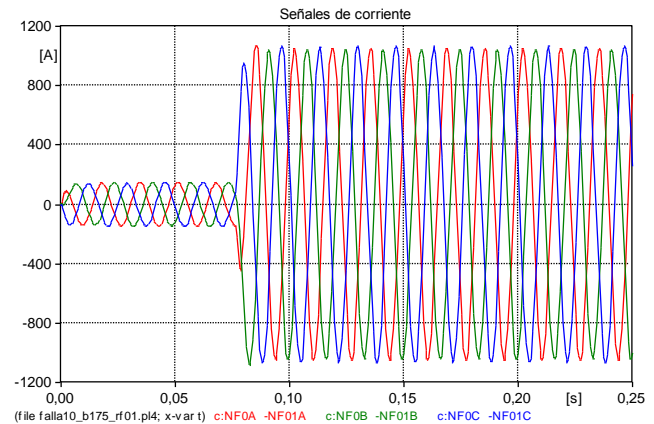


Figura A.2.282. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

Conclusiones: Las señales presentan el mismo comportamiento para los diferentes modelos de la carga.

La inyección de la falla influye en la tensión y la corriente, haciendo que disminuyan y aumenten respectivamente. En el caso de la tensión se observa una distorsión inicial que luego se estabiliza.

La corriente presenta valores estables en pre-falla y en estado de falla.

- **Para la fase B: ($T_{falla} = 64.998943$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que poseen el ATP (Caso base).*

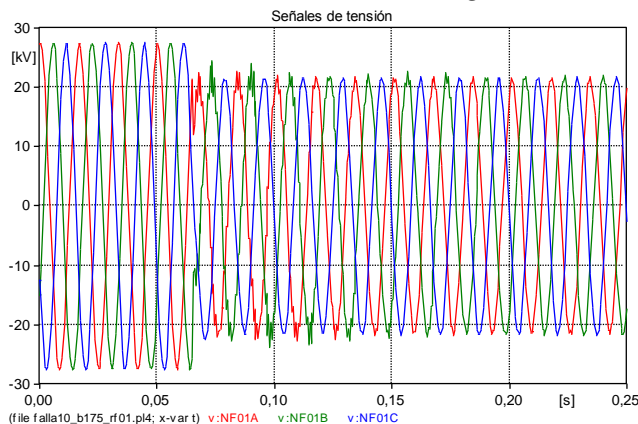


Figura A.2.283. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

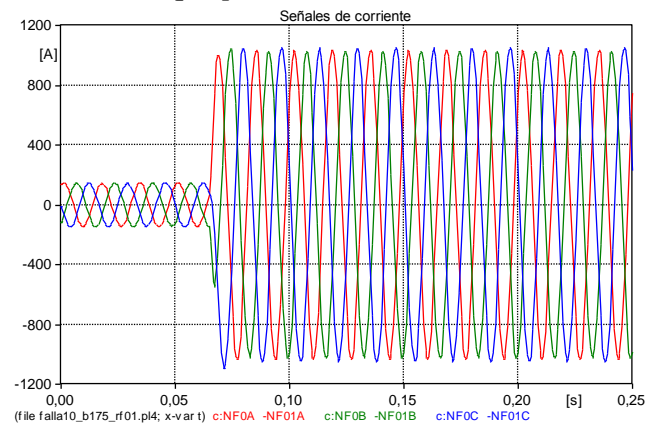


Figura A.2.284. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

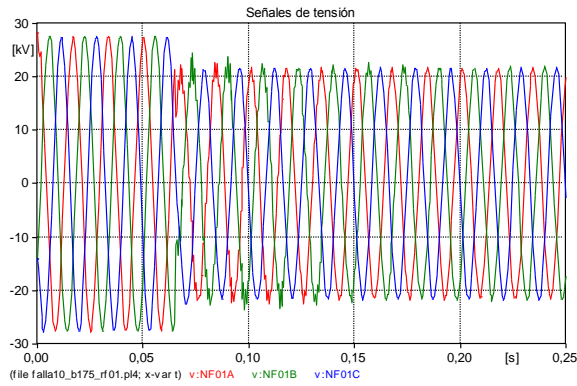


Figura A.2.285. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

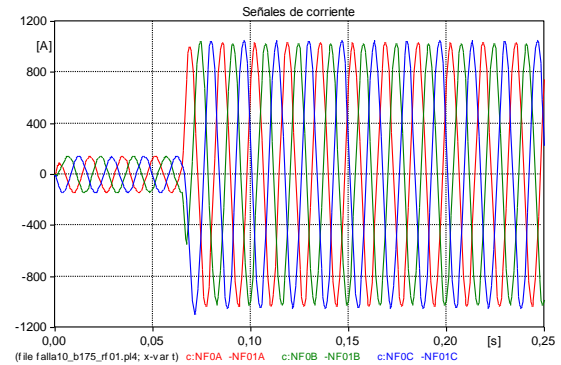


Figura A.2.286. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

○ Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.

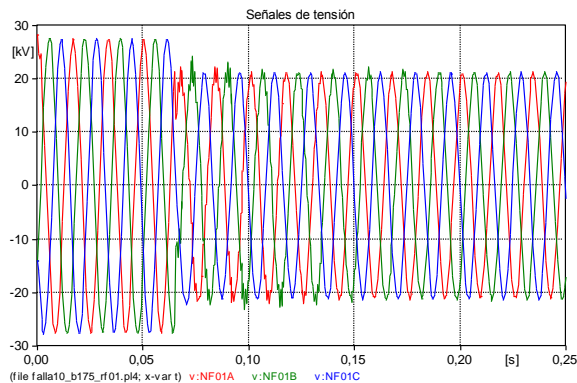


Figura A.2.287. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

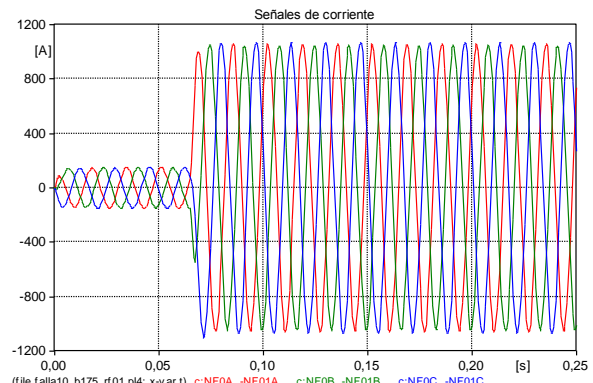


Figura A.2.288. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

○ Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.

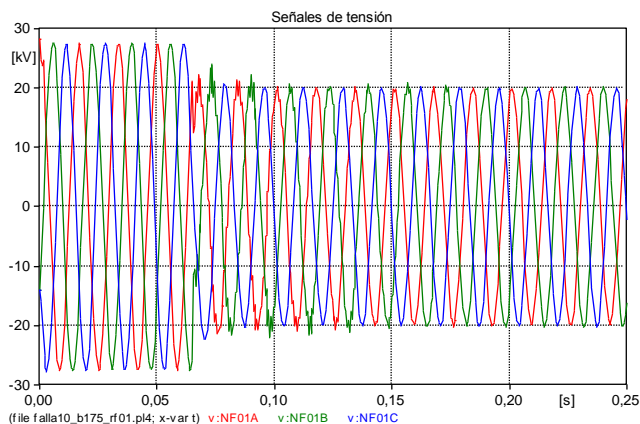


Figura A.2.289. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

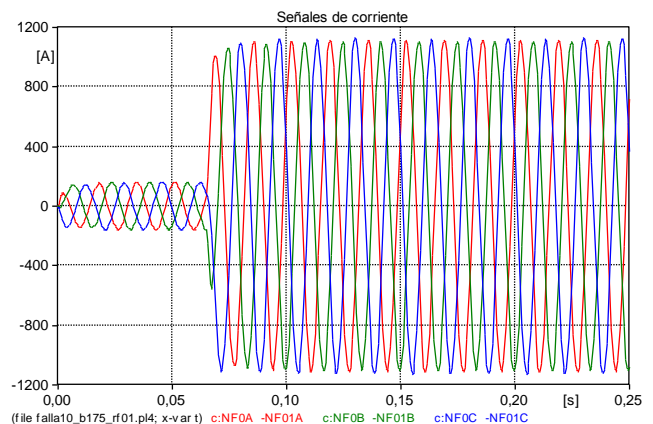


Figura A.2.290. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

- *Caso 5: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).*

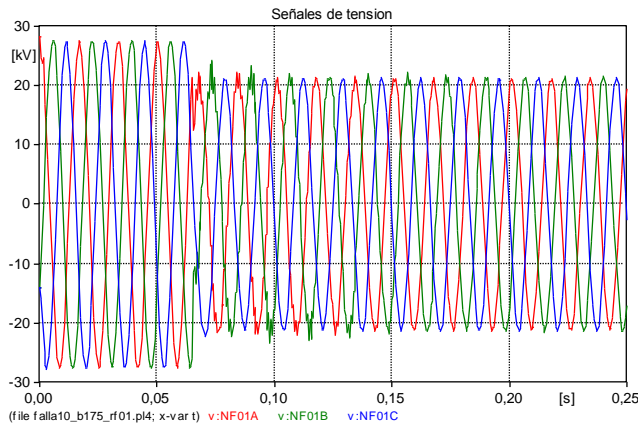


Figura A.2.291. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

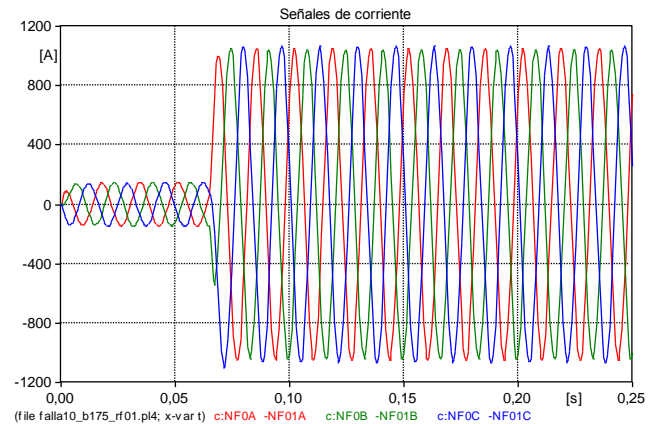


Figura A.2.292. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase A.

Conclusiones: Las señales presentan el mismo comportamiento para los diferentes modelos de la carga.

La inyección de la falla influye en la tensión y la corriente, haciendo que disminuyan y aumenten respectivamente. En el caso de la tensión se observa una distorsión inicial que luego se estabiliza.

La corriente presenta valores estables en pre-falla y en estado de falla.

- **Para la fase C: ($T_{falla} = 70.55715$ ms)**

- *Caso 1: Carga modelada con elementos que poseen el ATP (Caso base).*

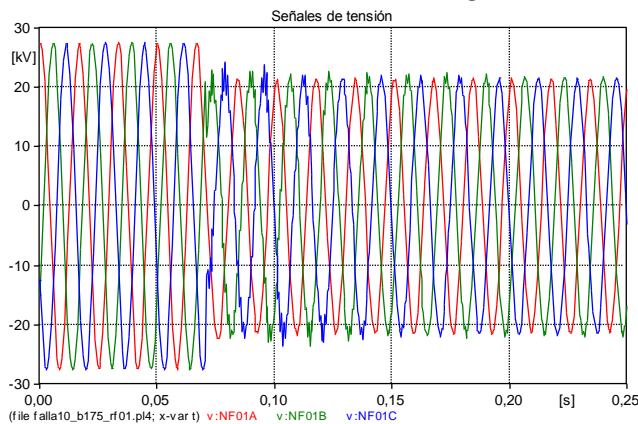


Figura A.2.293. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

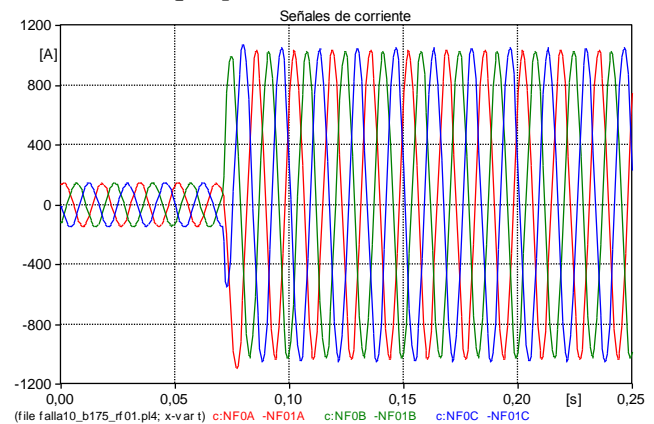


Figura A.2.294. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

- *Caso 2: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Z_{cte} .*

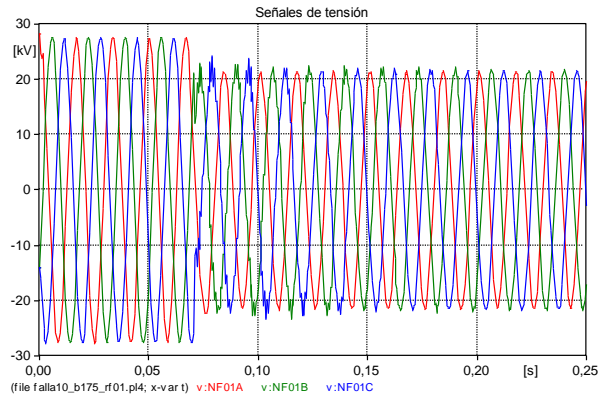


Figura A.2.295. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

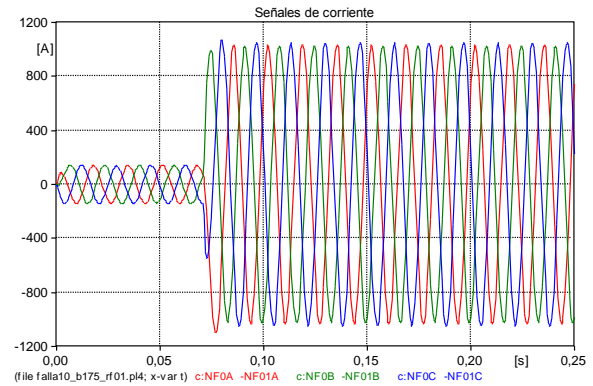


Figura A.2.296. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

○ *Caso 3: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Icte.*

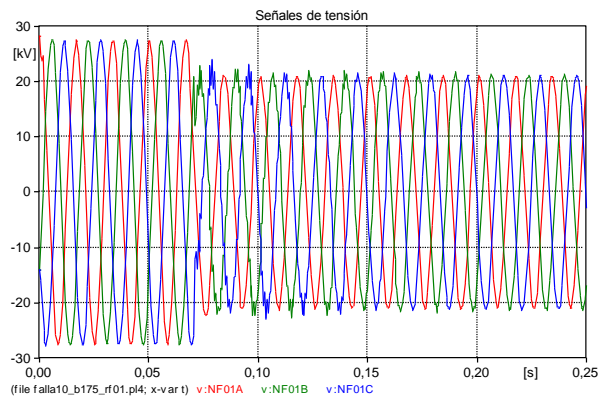


Figura A.2.297. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

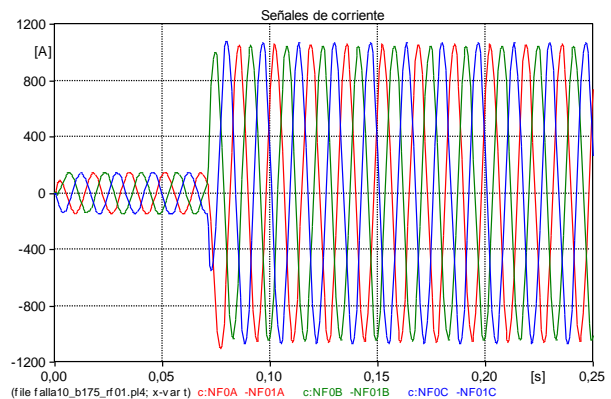


Figura A.2.298. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

○ *Caso 4: Carga modelada con herramienta de Models del ATP como Scte.*

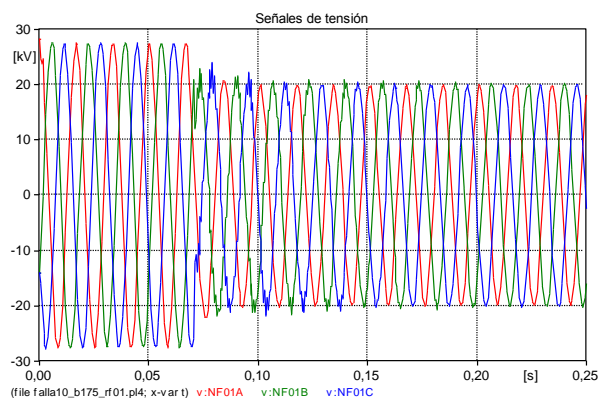


Figura A.2.299. Seales de Tensión con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

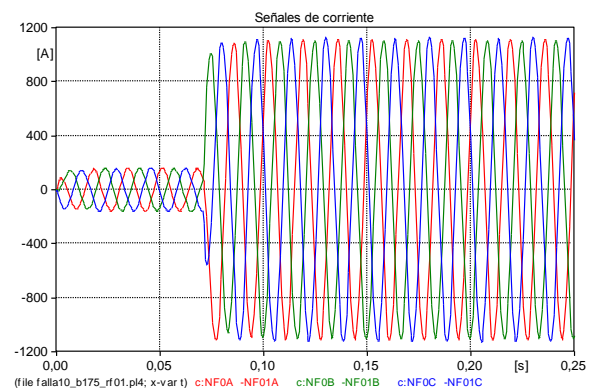


Figura A.2.300. Seales de corriente con inceptión de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

- Caso 5: Carga modelada con herramienta de *Models* del ATP como $0.2Z_{cte}$ mas $0.8I_{cte}$ (caso híbrido).

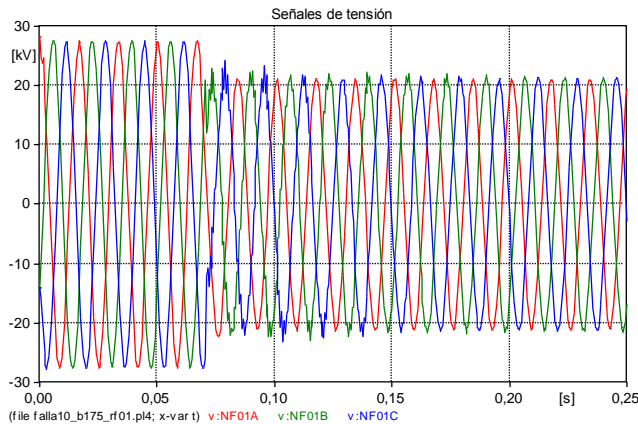


Figura A.2.301. Señales de Tensión con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

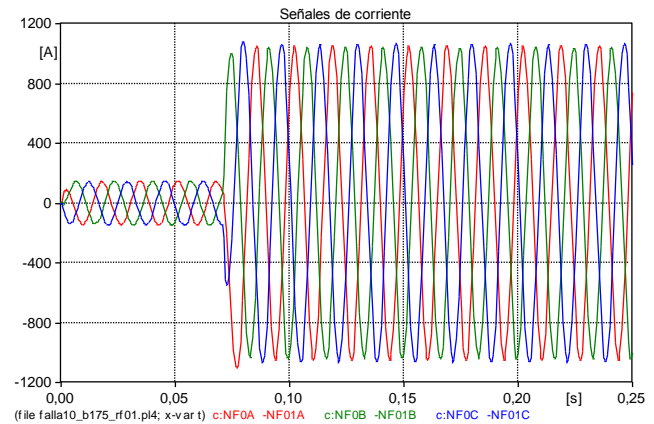


Figura A.2.302. Señales de corriente con inyección de falla teniendo en cuenta la señal (I) en valor máximo negativo en la fase C.

Conclusiones: Se nota el mismo comportamiento para todas las señales de tensión y corriente en los diferentes modelos de la carga.

Las señales de tensión presentan una distorsión inicial después de ocurrida la falla, que luego se estabiliza. En pre-falla la señal de tensión no presenta distorsión y es estable.

Las señales de corriente tienen una forma estable para valores de pre-falla y falla, pero en falla la corriente es mayor.

4. Conclusiones

El modelo programado por medio de la herramienta de *Models* en ATP, reproduce de forma correcta el comportamiento de la carga ante diferentes tipos de falla, como quedó demostrado mediante simulaciones realizadas para este trabajo de investigación.

Las señales presentan el mismo comportamiento para los diferentes modelos de la carga. La inyección de la falla influye en la tensión y la corriente, haciendo que disminuyan y aumenten respectivamente. En el caso de la tensión se observa una distorsión inicial después de ocurrida la falla, que luego se estabiliza, corroborando la estabilidad del modelo para su uso. Adicionalmente, nuevos modelos de la carga, no considerados anteriormente en la mayoría de documentos referentes a la localización de fallas son presentados.

Finalmente, la consideración de modelos de carga reales, ayuda el mejoramiento del desempeño de los localizadores de falla, proporcionando una herramienta útil para mejorar la calidad de la energía entregada al usuario final.

Anexo B.1. Gráficas para análisis de sensibilidad del circuito IEEE de 34 nodos con el MBM E1

Todos los gráficos muestran el error absoluto definido en la ecuación (4.1) contra la distancia de falla.

1. Validación a condición nominal con circuito modelado como Z_{cte}

a) Falla monofásica (AT)

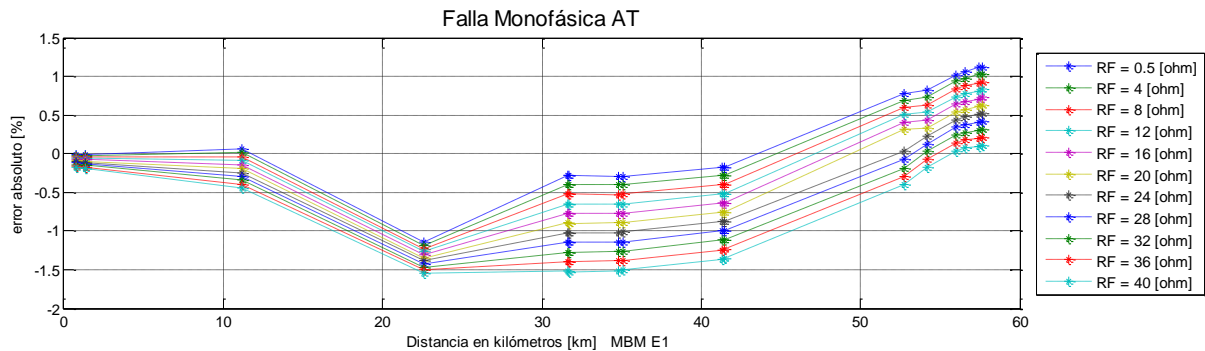


Figura B.1.1

b) Falla bifásica (AB)

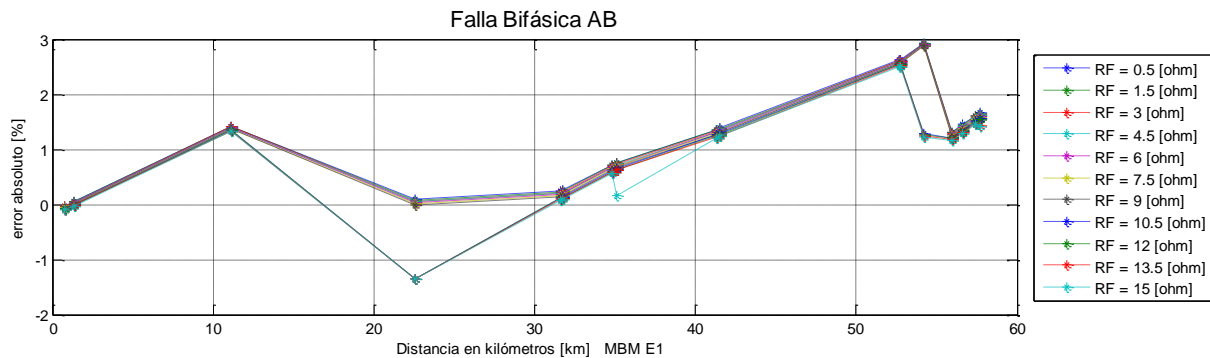


Figura B.1.2

c) Falla trifásica (ABC)

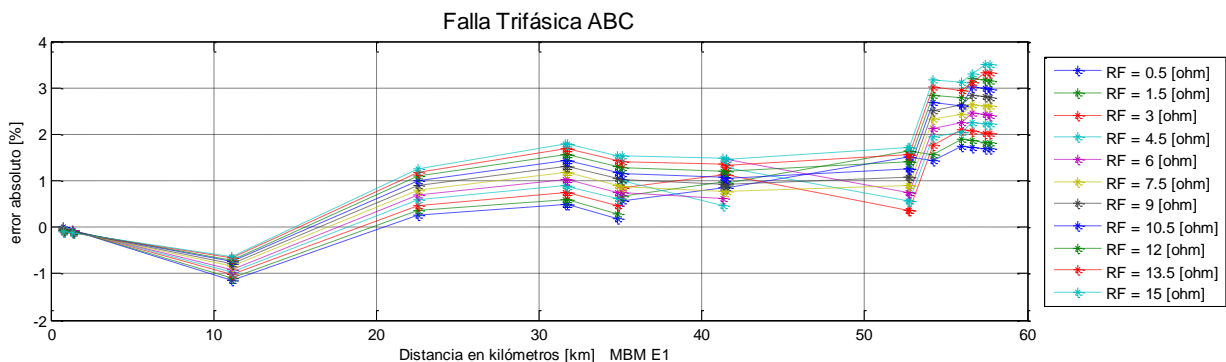


Figura B.1.3

2. Variaciones de carga

2.1. Validación a condición aleatoria de Carga [10-30]%

✓ Modelo de impedancia constante (Z_{cte})

a) Falla monofásica (AT)

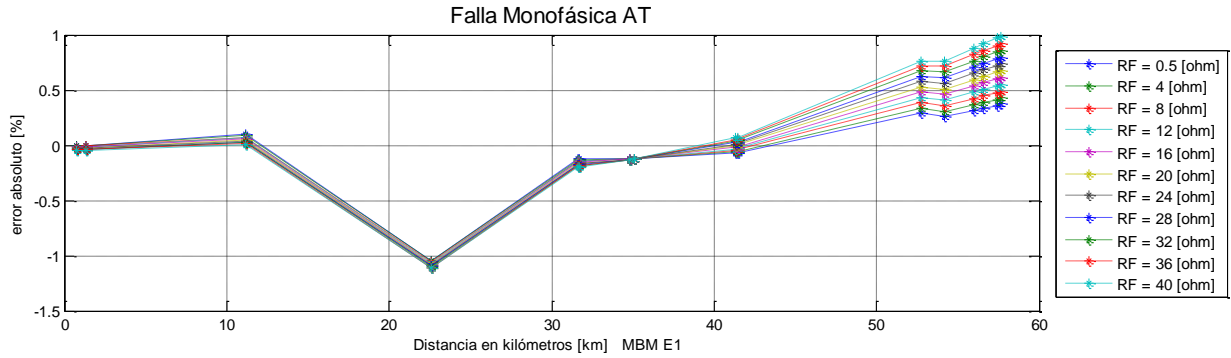


Figura B.1.4

b) Falla bifásica (AB)

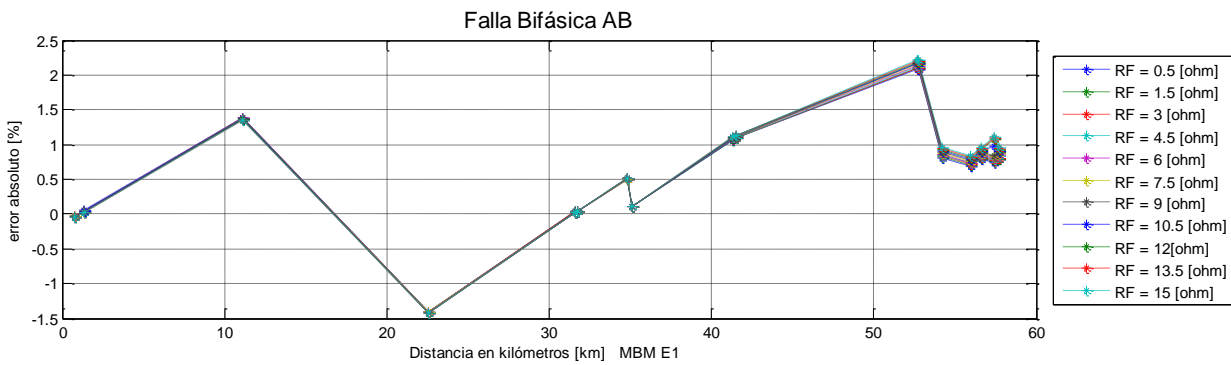


Figura B.1.5

c) Falla trifásica (ABC)

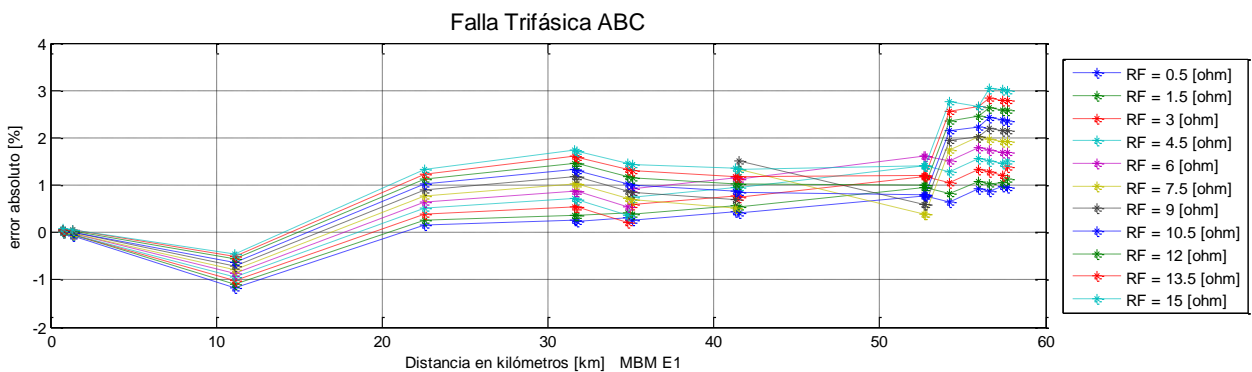
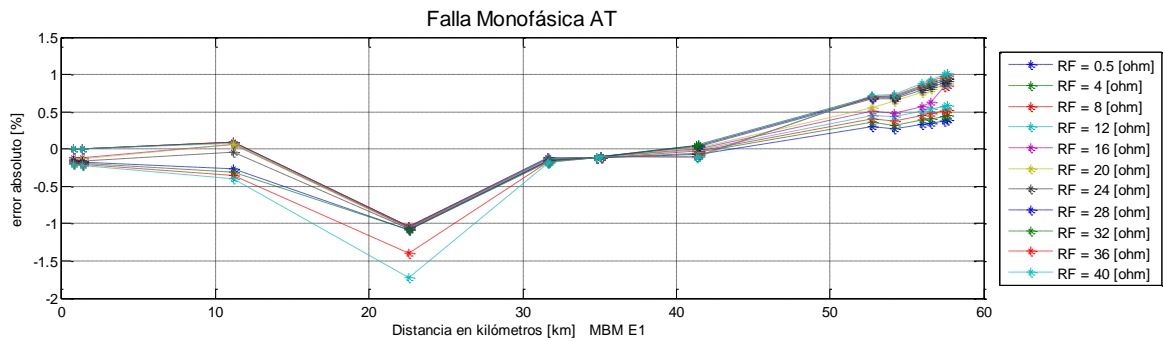


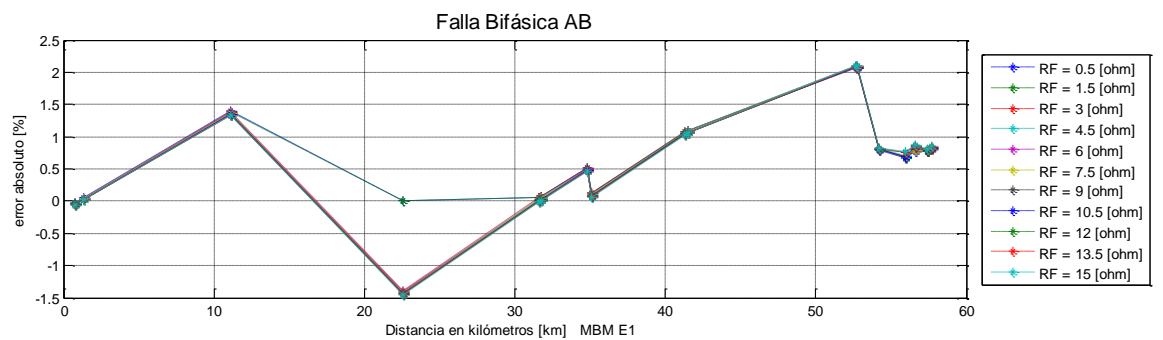
Figura B.1.6

✓ Modelo de corriente constante (I_{cte})

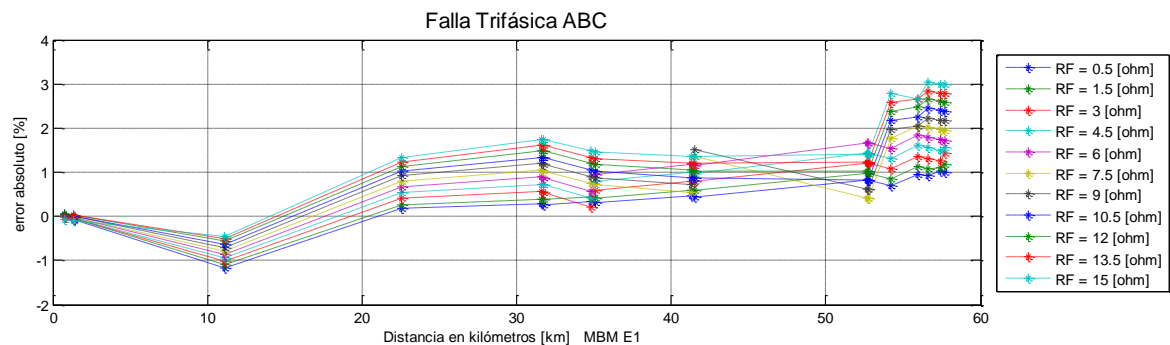
a) Falla monofásica (AT)



b) *Falla bifásica (AB)*

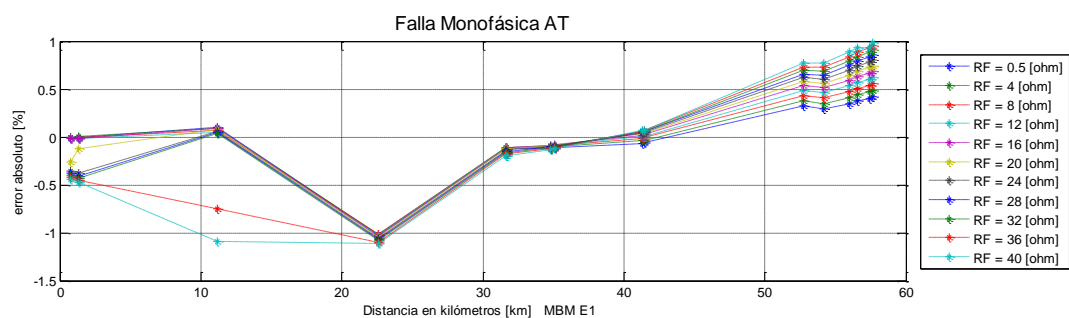


c) *Falla trifásica (ABC)*



✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*

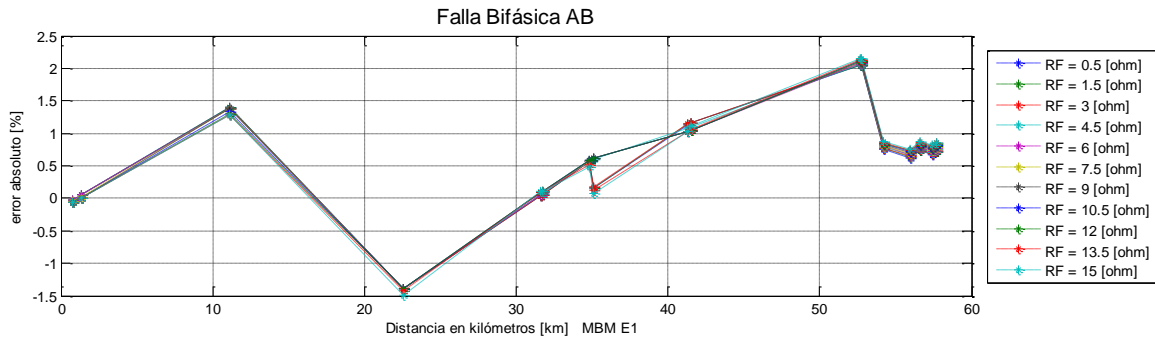


Figura B.1.11

c) *Falla trifásica (ABC)*

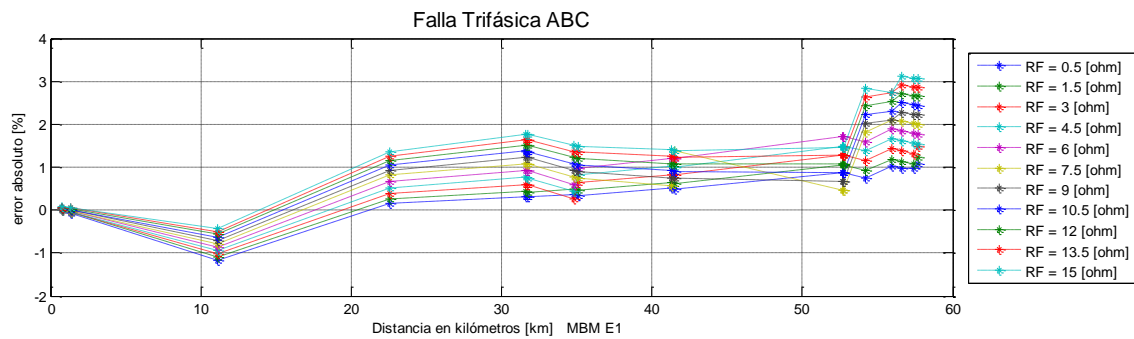


Figura B.1.12

✓ **Modelo híbrido (0.8I_{cte}+0.2Z_{cte})**

a) *Falla monofásica (AT)*

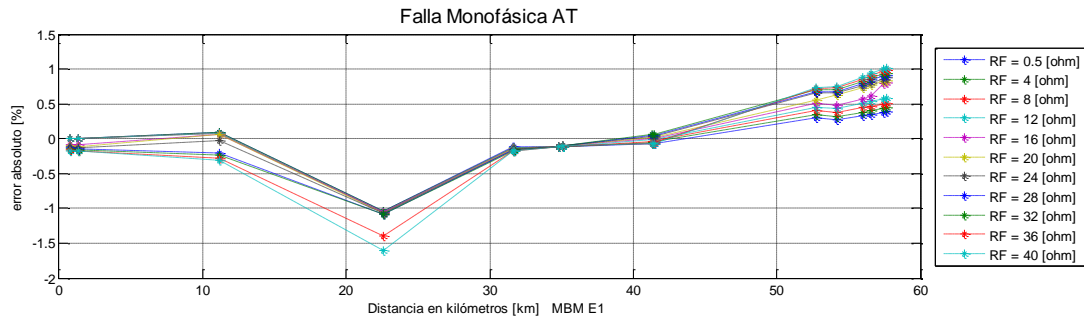


Figura B.1.13

b) *Falla bifásica (AB)*

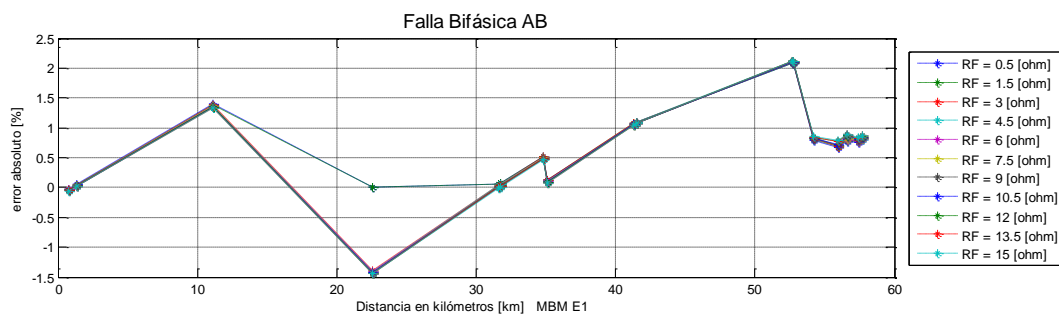


Figura B.1.14

c) *Falla trifásica (ABC)*

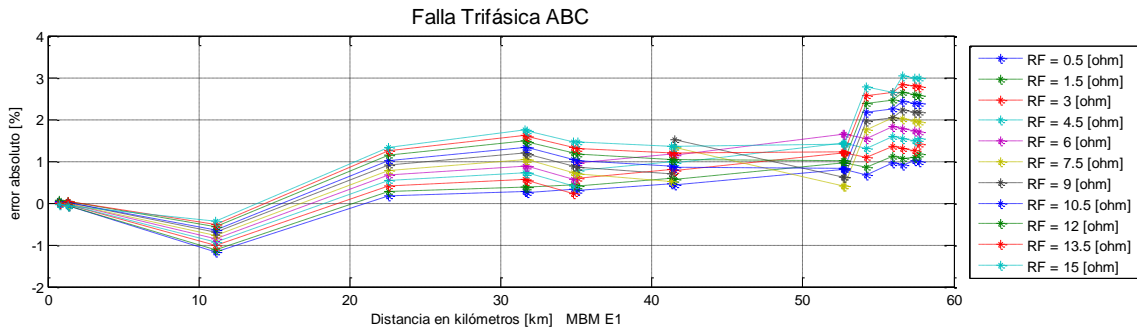


Figura B.1.15

✓ **Modelo híbrido original del IEEE 34 nodos**

a) *Falla monofásica (AT)*

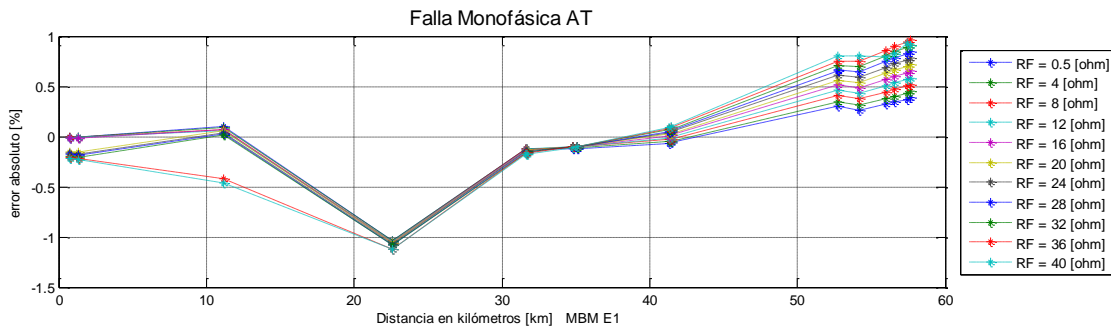


Figura B.1.16

b) *Falla bifásica (AB)*

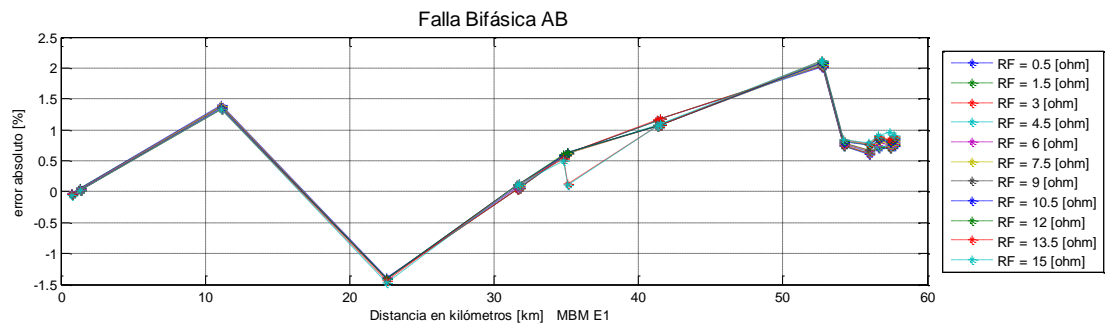


Figura B.1.17

c) *Falla trifásica (ABC)*

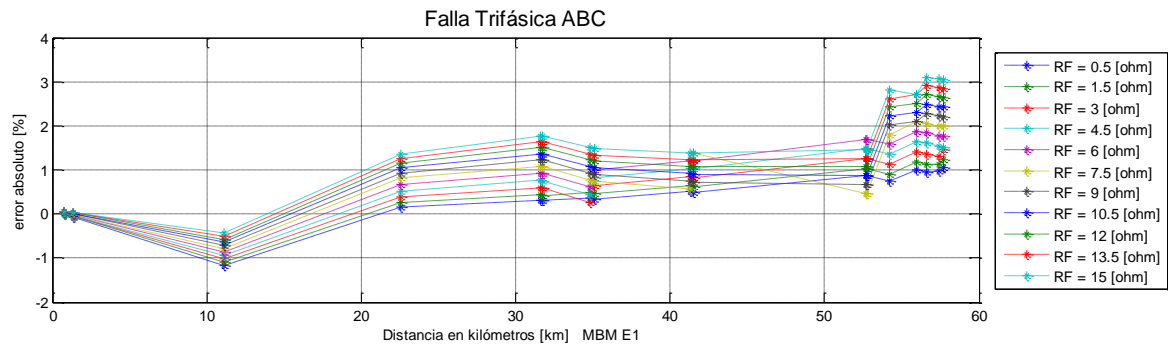


Figura B.1.18

2.2. Validación a condición aleatoria de Carga [60-100]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

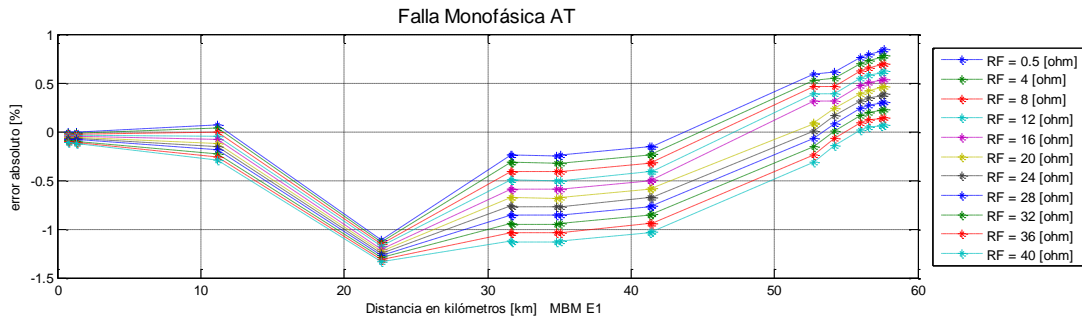


Figura B.1.19

b) Falla bifásica (AB)

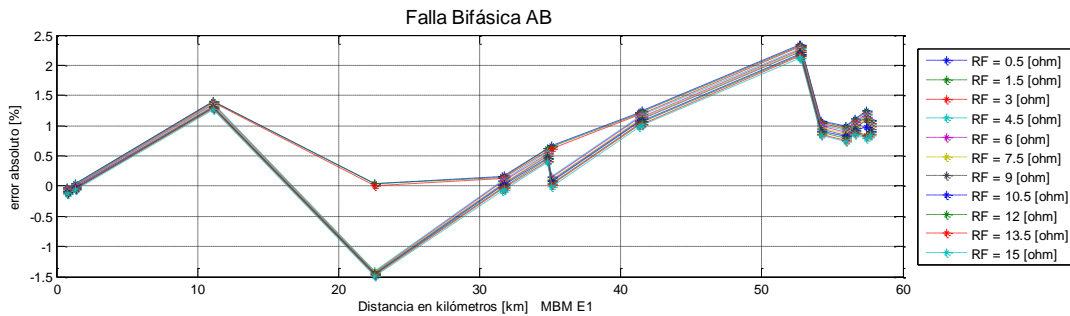


Figura B.1.20

c) Falla trifásica (ABC)

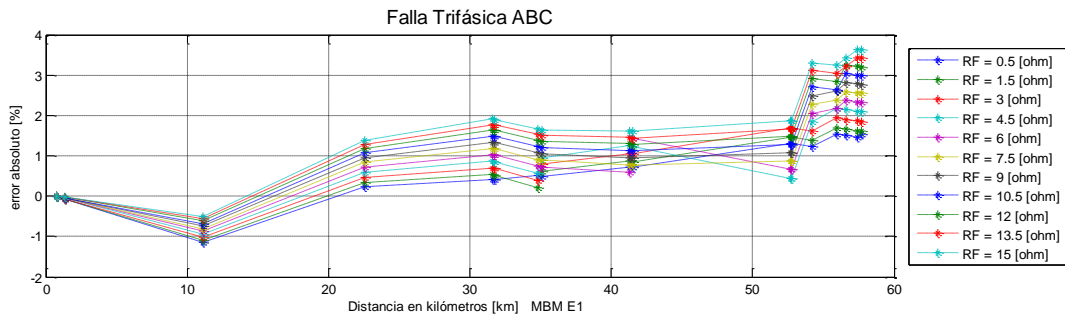


Figura B.1.21

✓ Modelo de corriente constante (Icte)

a) Falla monofásica (AT)

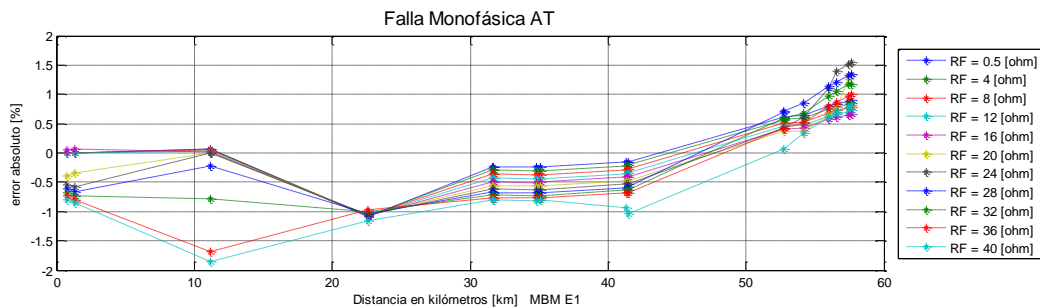
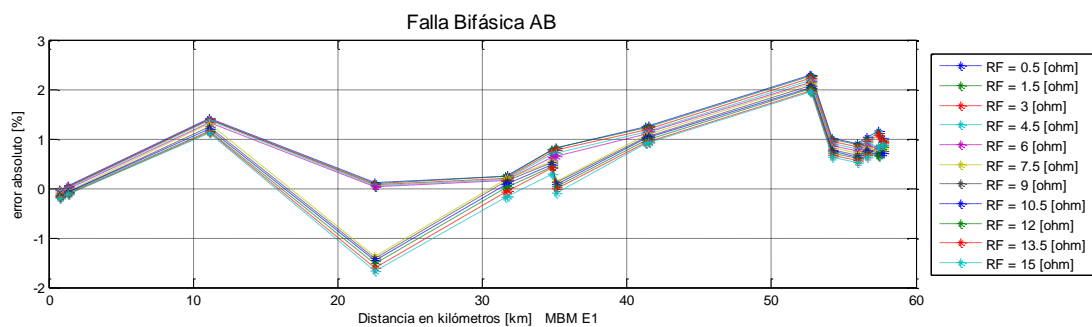
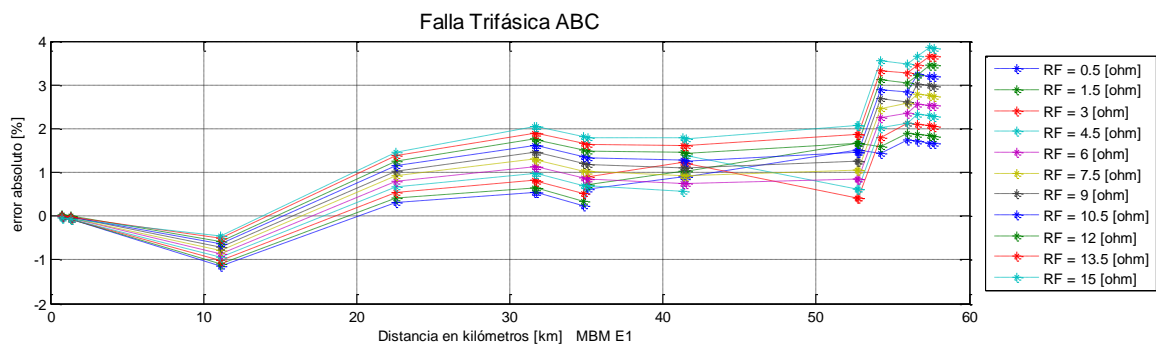


Figura B.1.22

b) *Falla bifásica (AB)*

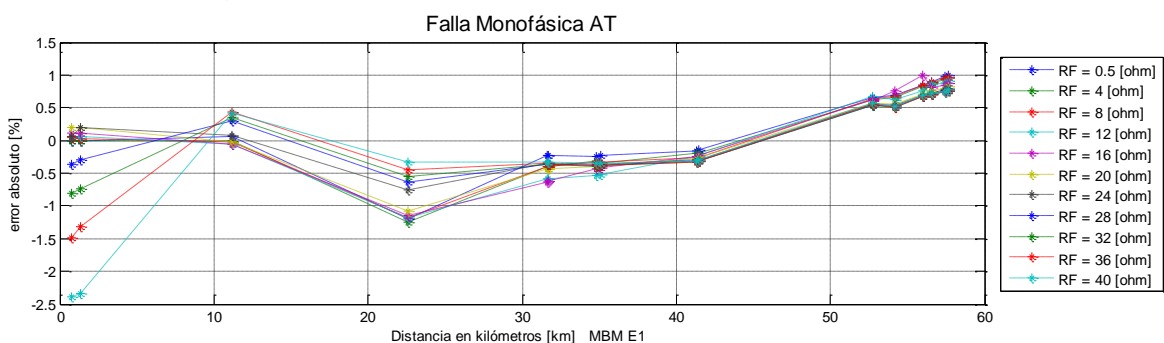


c) *Falla trifásica (ABC)*

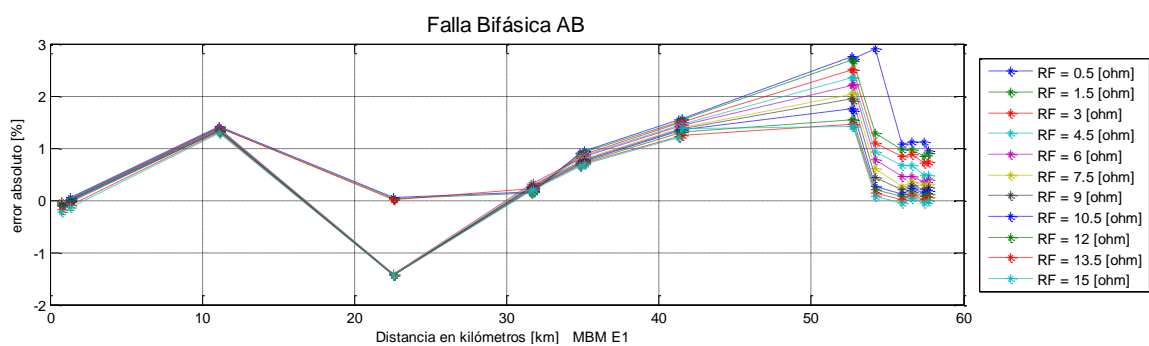


✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

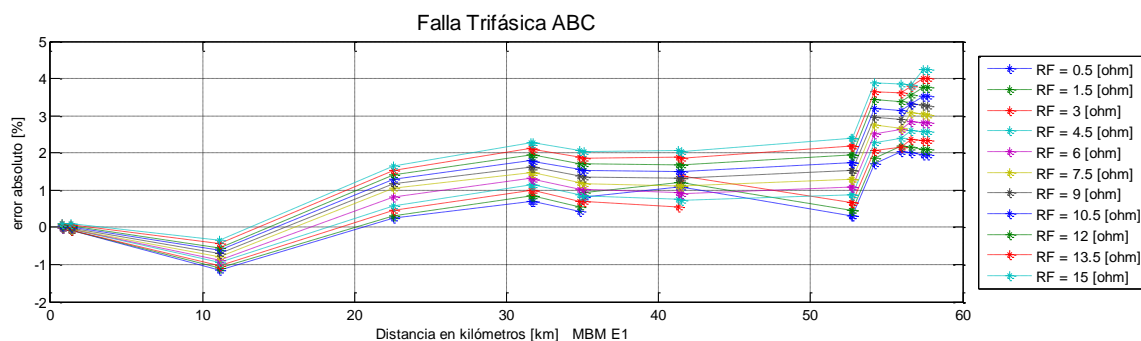


Figura B.1.27

✓ **Modelo híbrido (0.8Icte+0.2Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

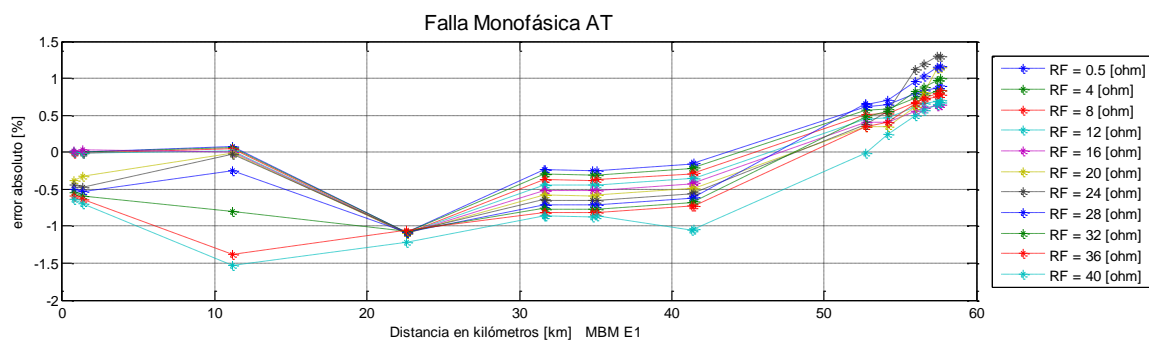


Figura B.1.28

b) *Falla bifásica (AB)*

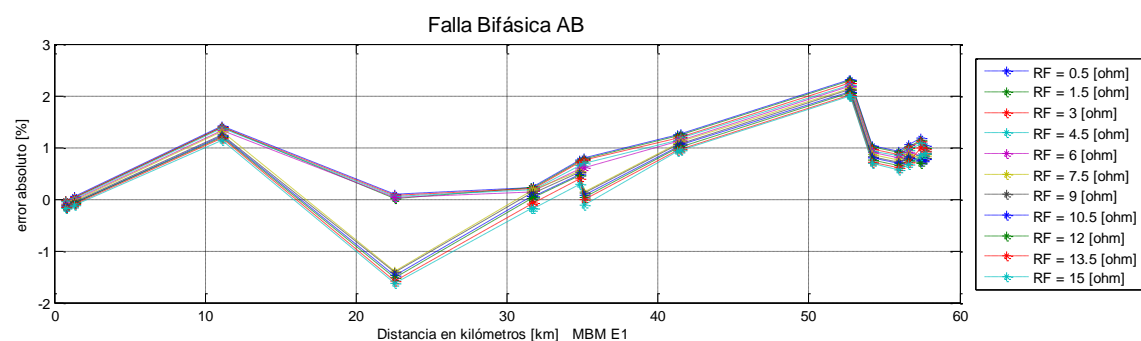


Figura B.1.29

c) *Falla trifásica (ABC)*

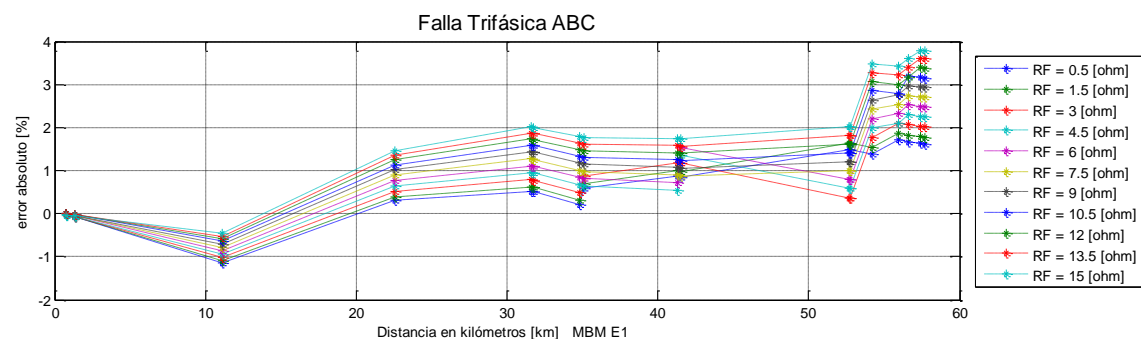


Figura B.1.30

✓ **Modelo híbrido original del IEEE 34 nodos**

a) *Falla monofásica (AT)*

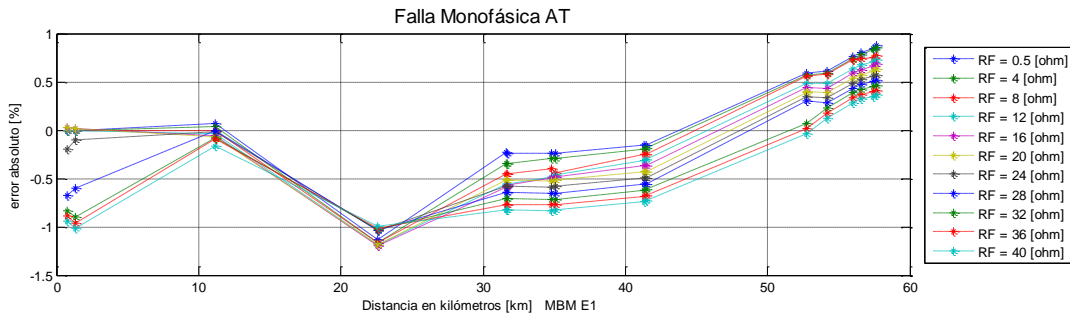


Figura B.1.31

b) *Falla bifásica (AB)*

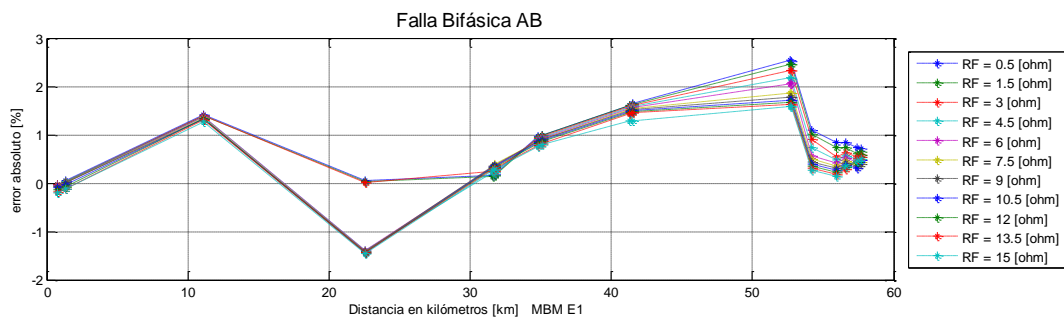


Figura B.1.32

c) *Falla trifásica (ABC)*

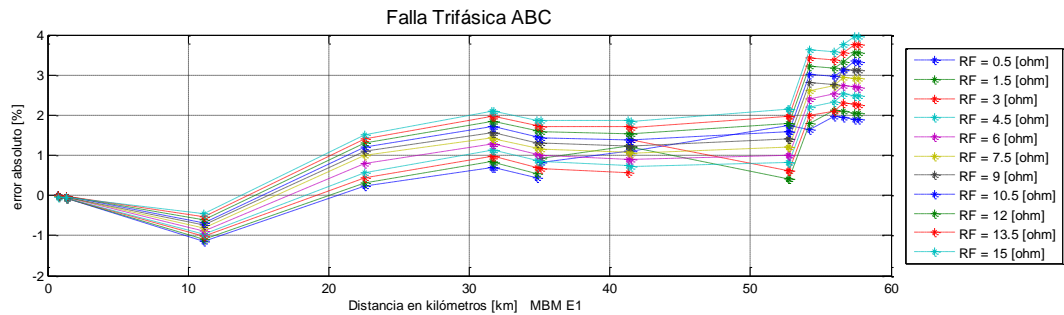


Figura B.1.33

2.3. Validación a condición aleatoria de Carga [135-145]%

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

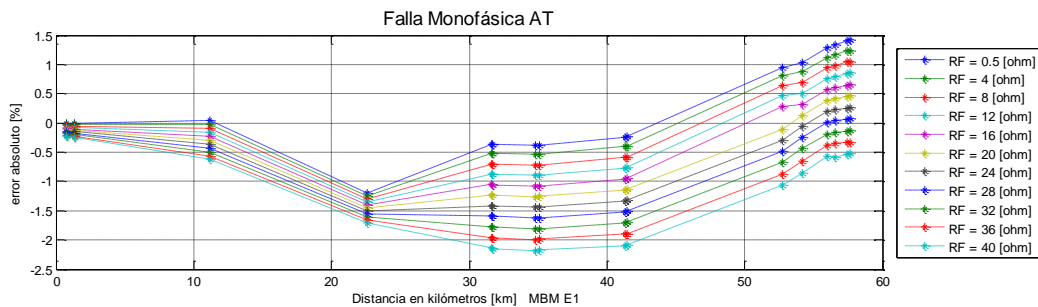


Figura B.1.34

b) *Falla bifásica (AB)*

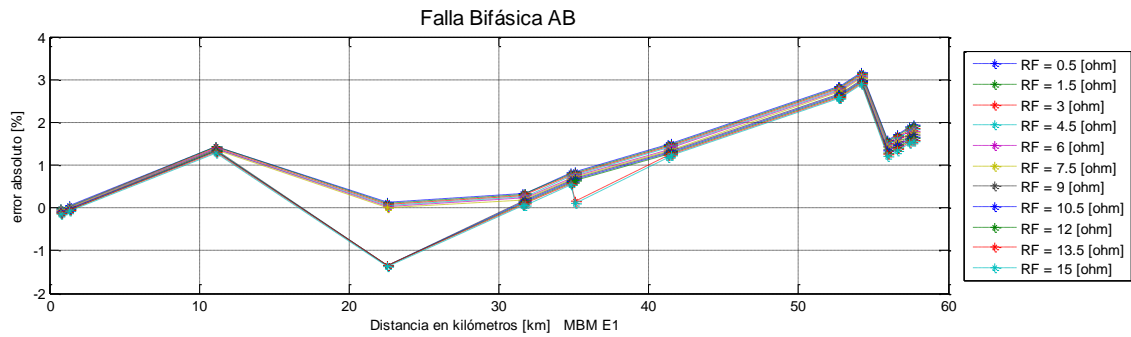


Figura B.1.35

c) *Falla trifásica (ABC)*

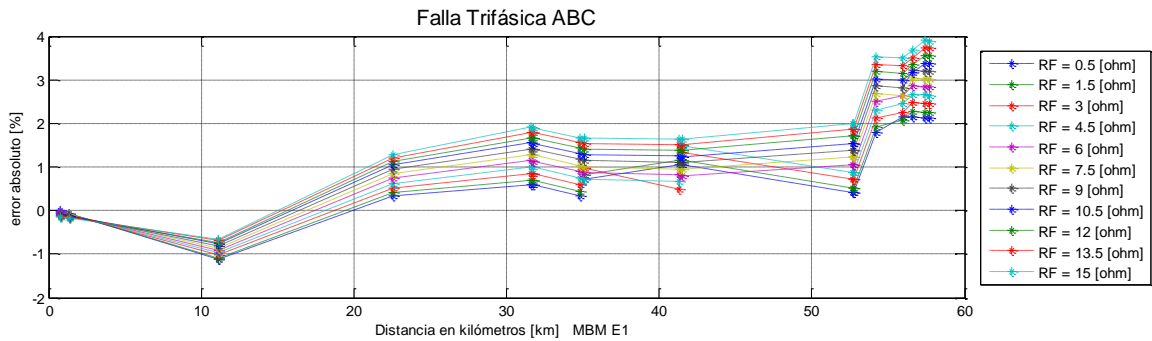


Figura B.1.36

✓ **Modelo de corriente constante (Icte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

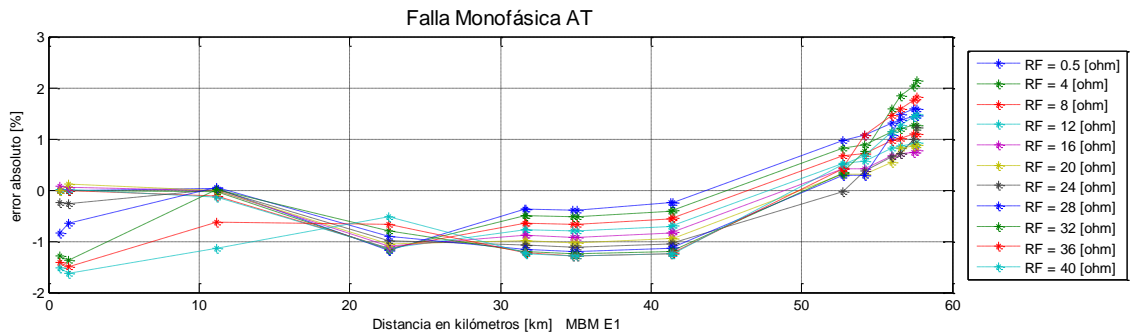


Figura B.1.37

b) *Falla bifásica (AB)*

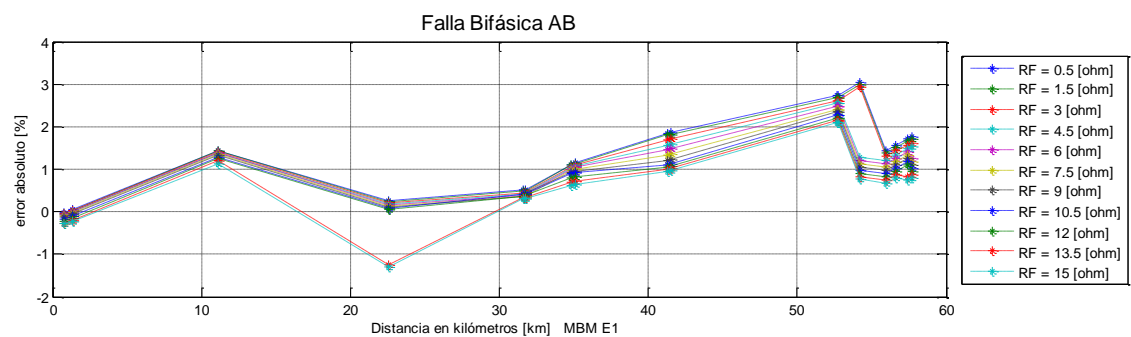


Figura B.1.38

c) *Falla trifásica (ABC)*

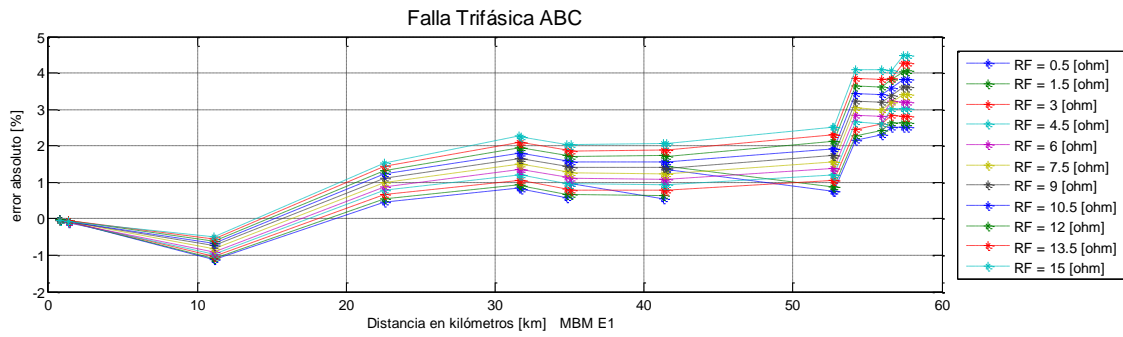


Figura B.1.39

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

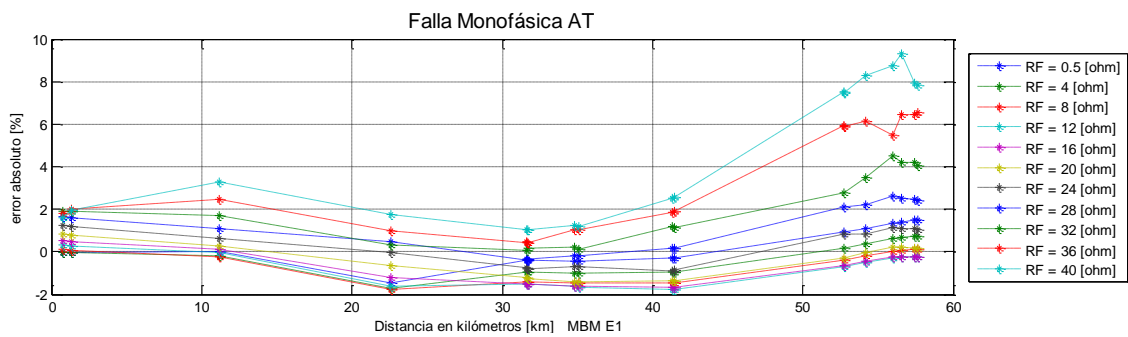


Figura B.1.40

b) *Falla bifásica (AB)*

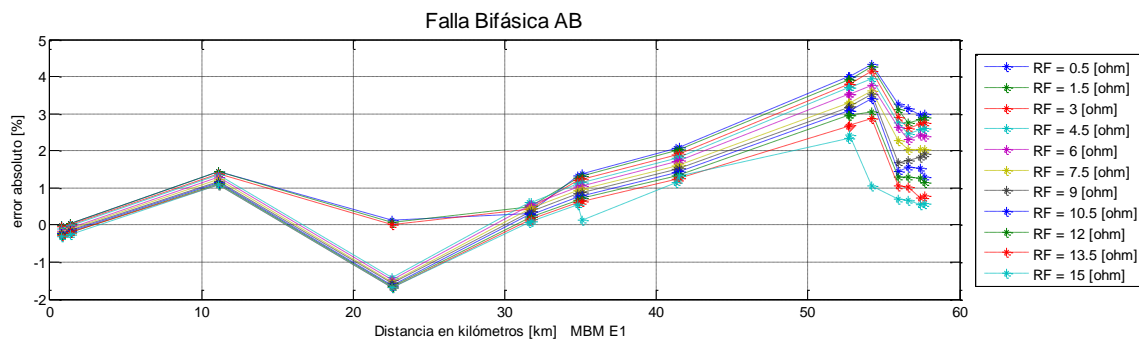


Figura B.1.41

c) *Falla trifásica (ABC)*

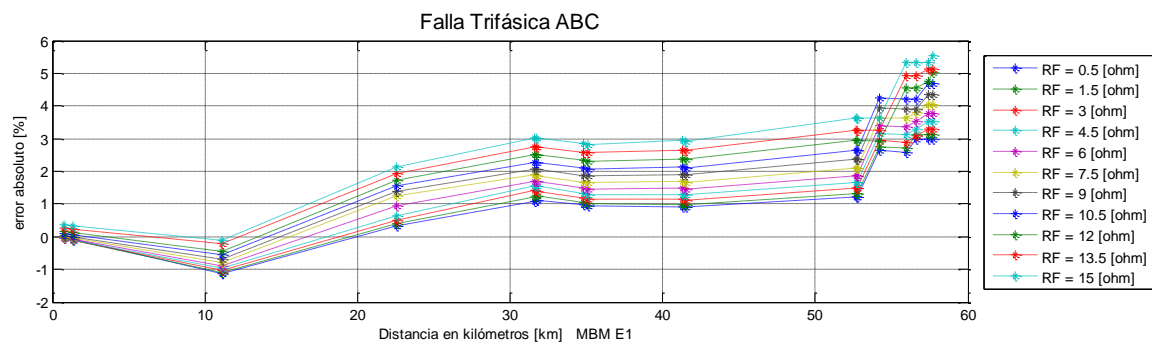
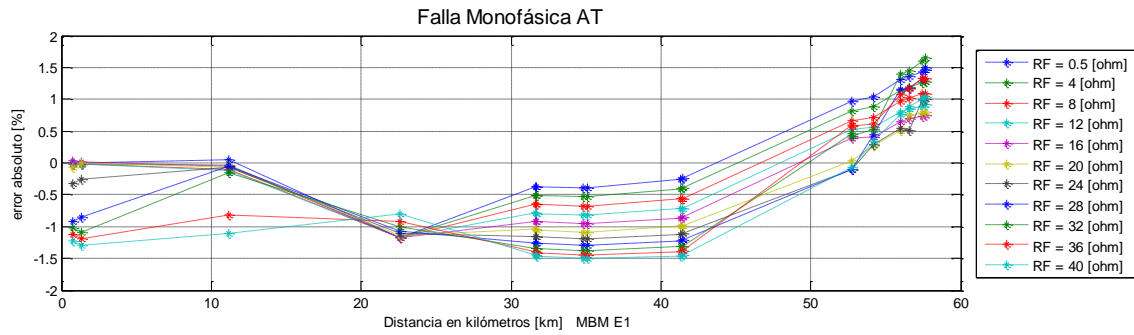


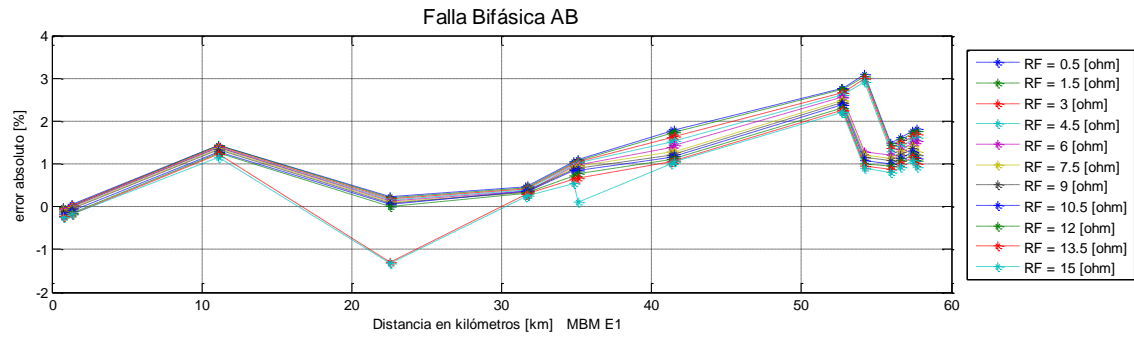
Figura B.1.42

✓ **Modelo híbrido (0.8Icte+0.2Zcte)**

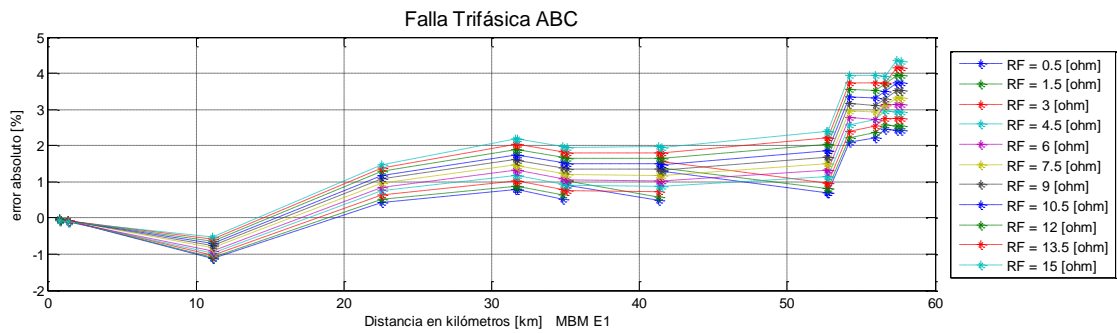
a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*

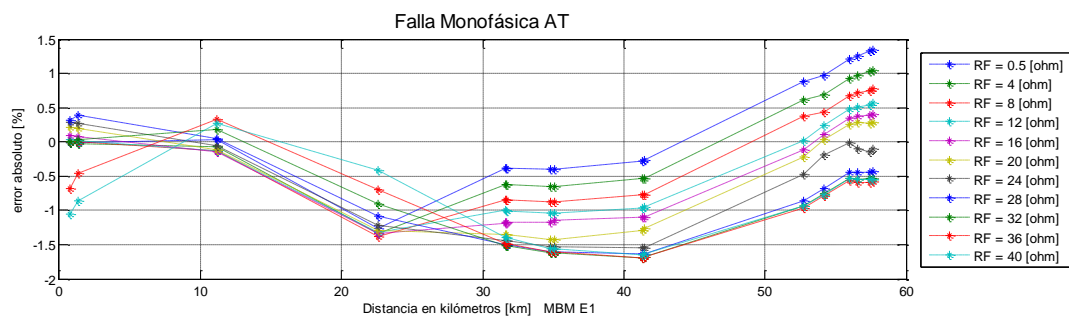


c) *Falla trifásica (ABC)*

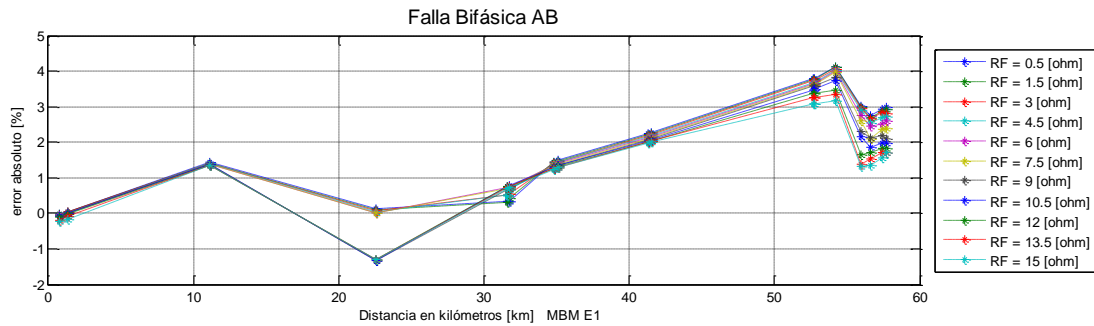


✓ **Modelo híbrido original del IEEE 34 nodos**

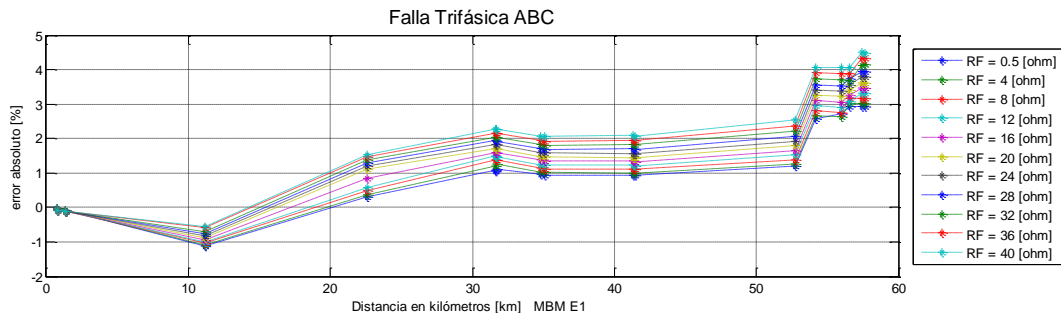
a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

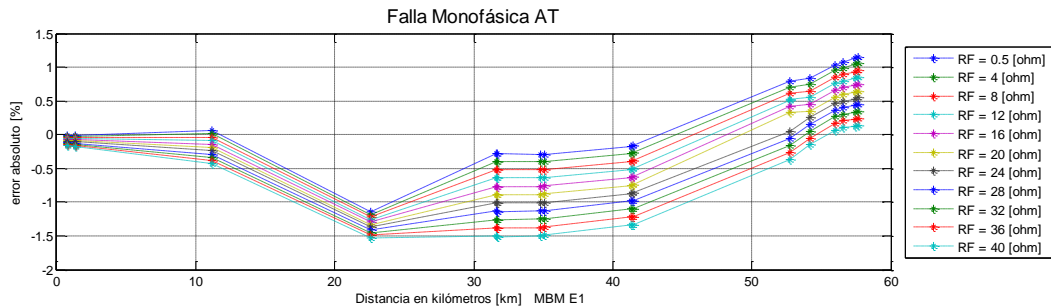


3. Variación aleatoria de la magnitud de la tensión de la Fuente

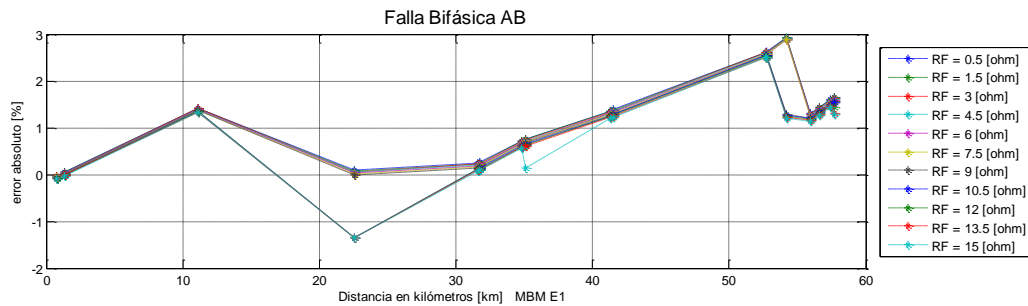
3.1. Variación aleatoria de la Tensión de la Fuente [0.95 – 1.05]

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

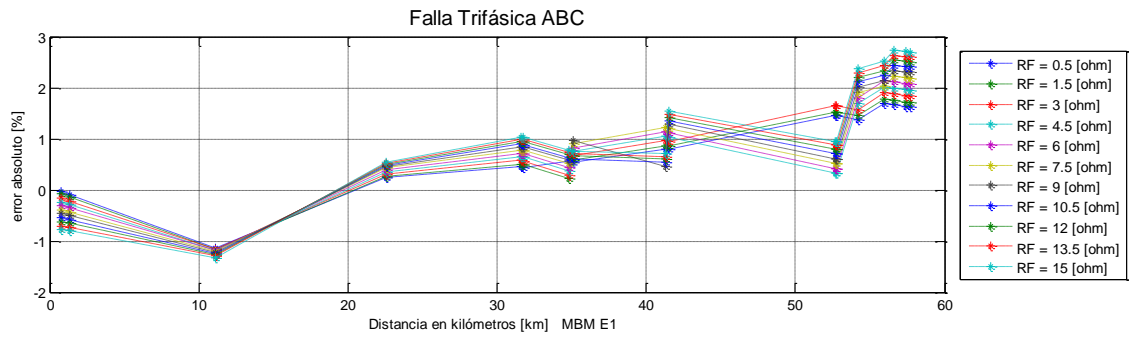


Figura B.1.51

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

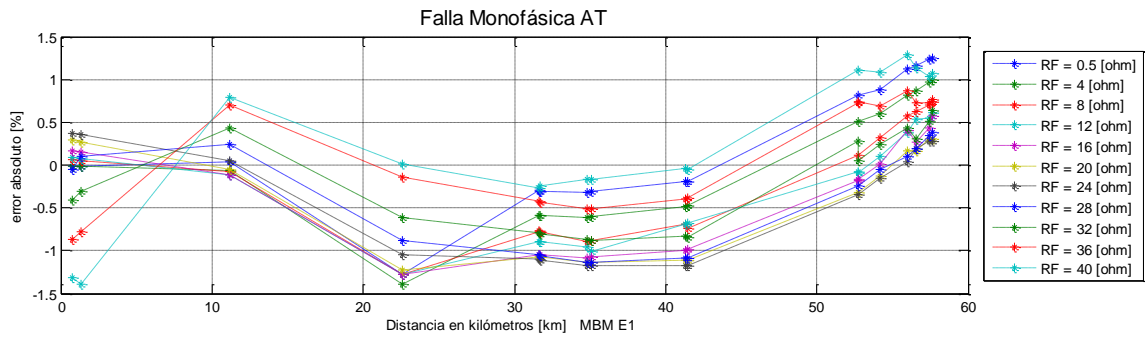


Figura B.1.52

b) *Falla bifásica (AB)*

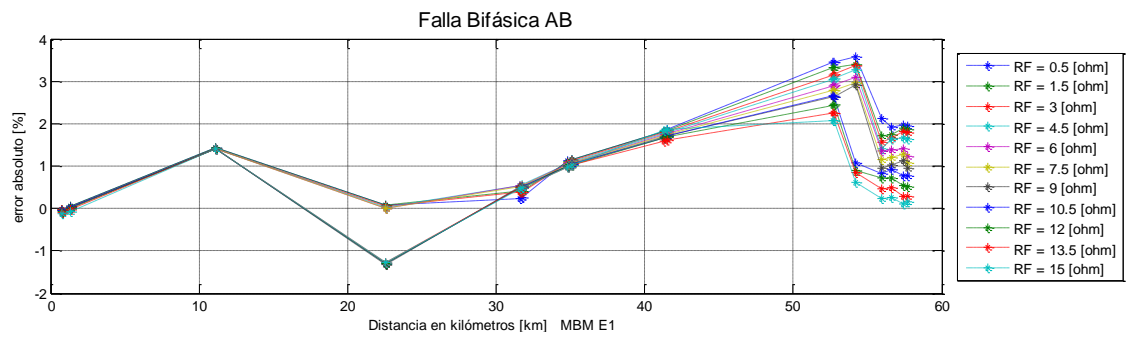


Figura B.1.53

c) *Falla trifásica (ABC)*

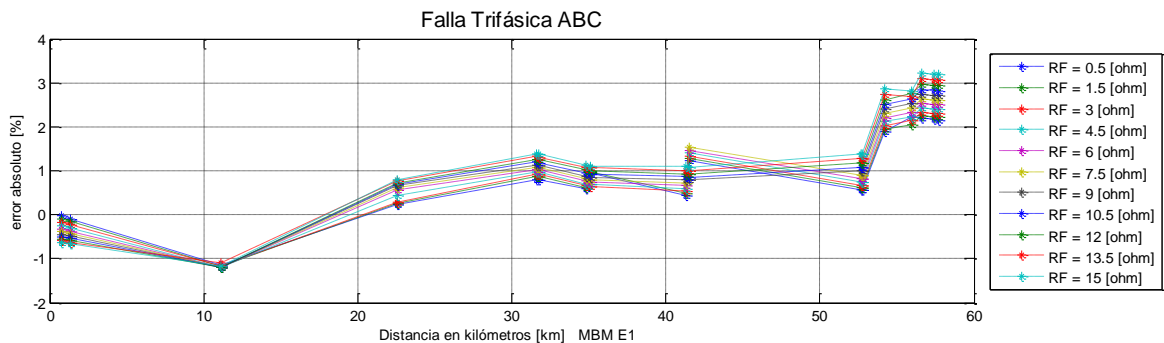


Figura B.1.54

4. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores

4.1. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [95 - 98]%

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

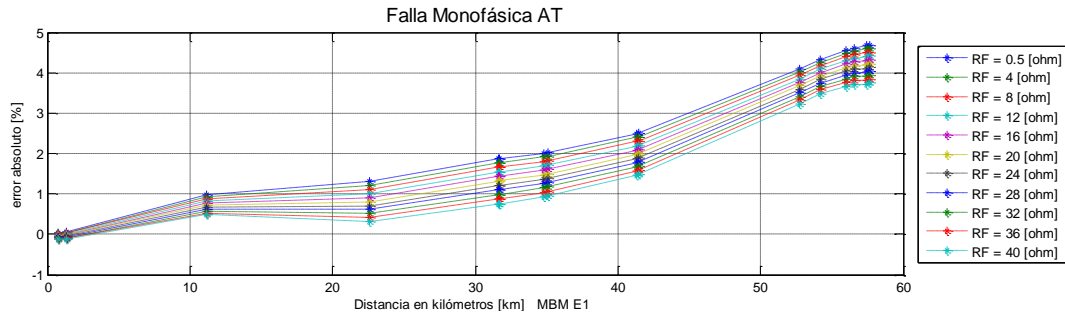


Figura B.1.55

b) *Falla bifásica (AB)*

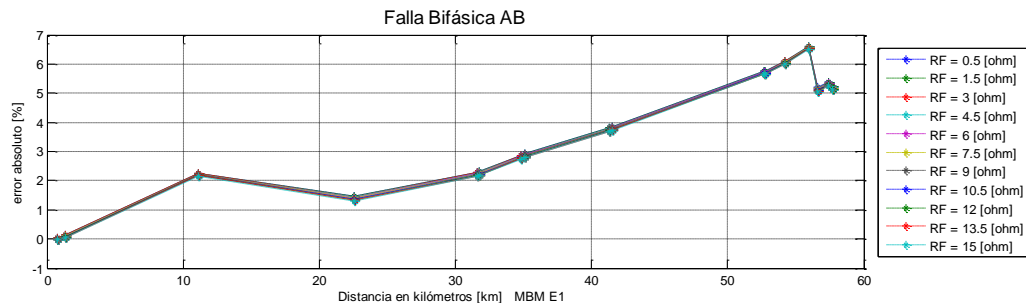


Figura B.1.56

c) *Falla trifásica (ABC)*

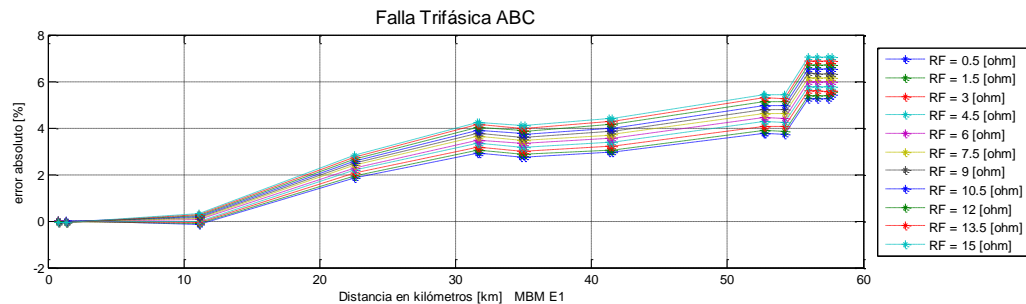


Figura B.1.57

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

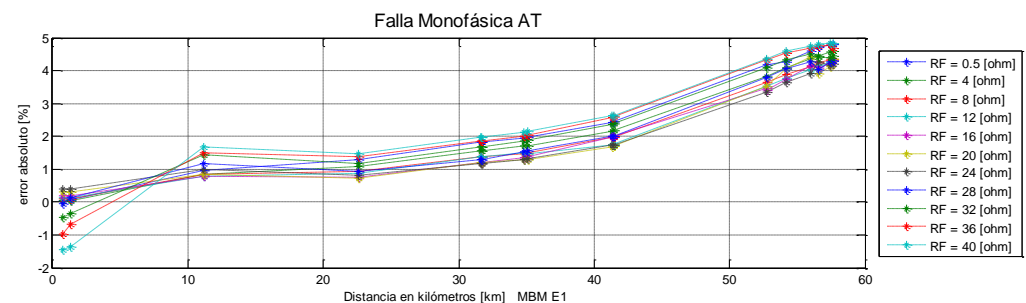


Figura B.1.58

b) *Falla bifásica (AB)*

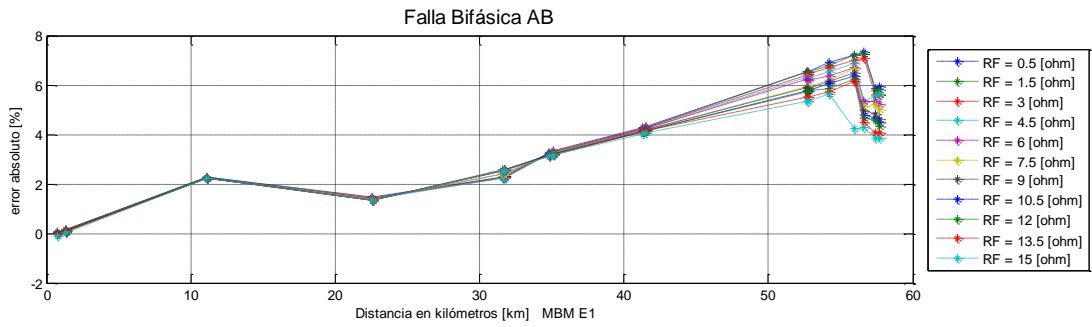


Figura B.1.59

c) *Falla trifásica (ABC)*

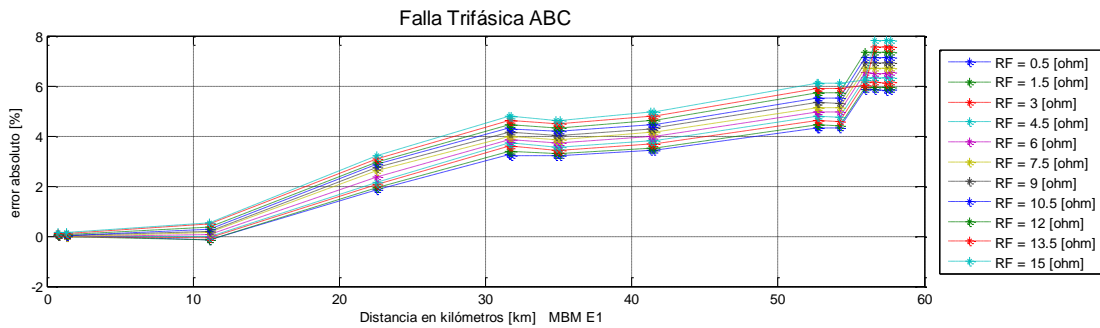


Figura B.1.60

4.2. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [98 - 102]%

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

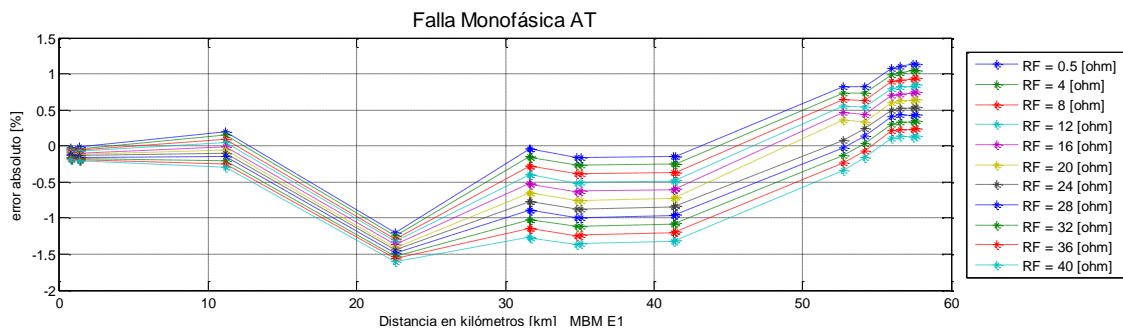


Figura B.1.61

b) *Falla bifásica (AB)*

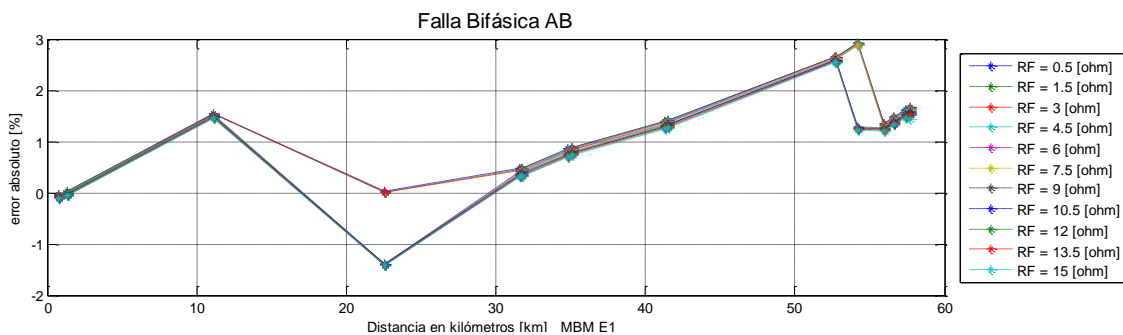


Figura B.1.62

c) *Falla trifásica (ABC)*

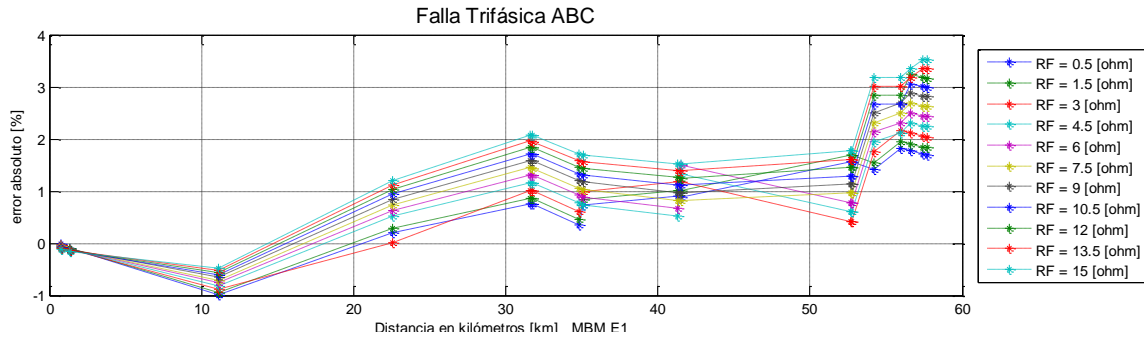


Figura B.1.63

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

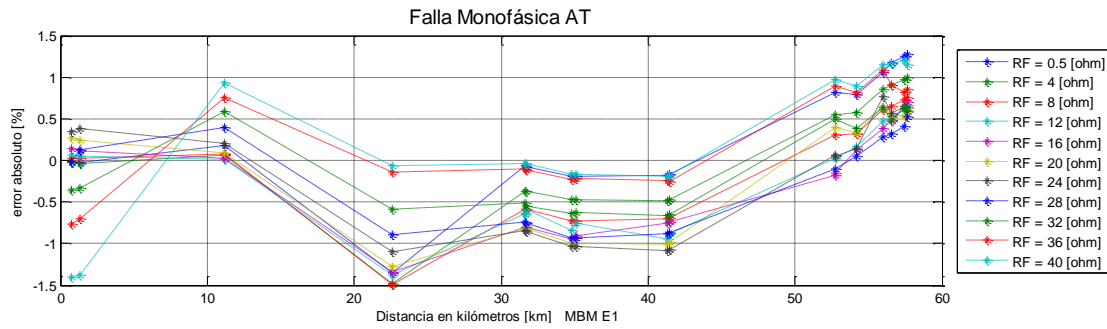


Figura B.1.64

b) *Falla bifásica (AB)*

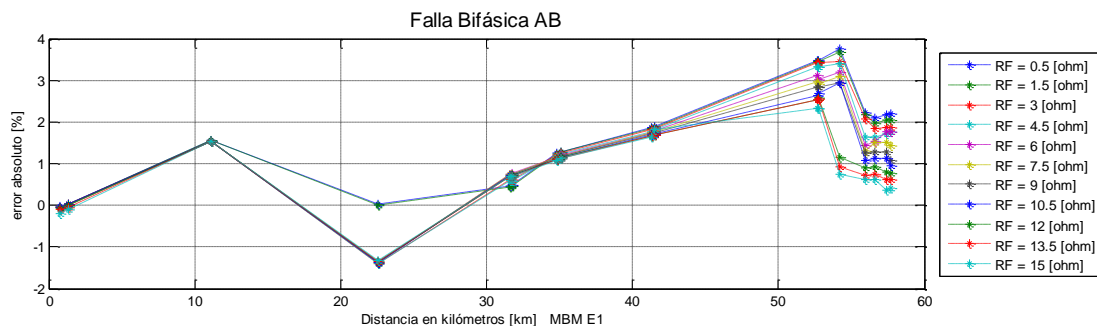


Figura B.1.65

c) *Falla trifásica (ABC)*

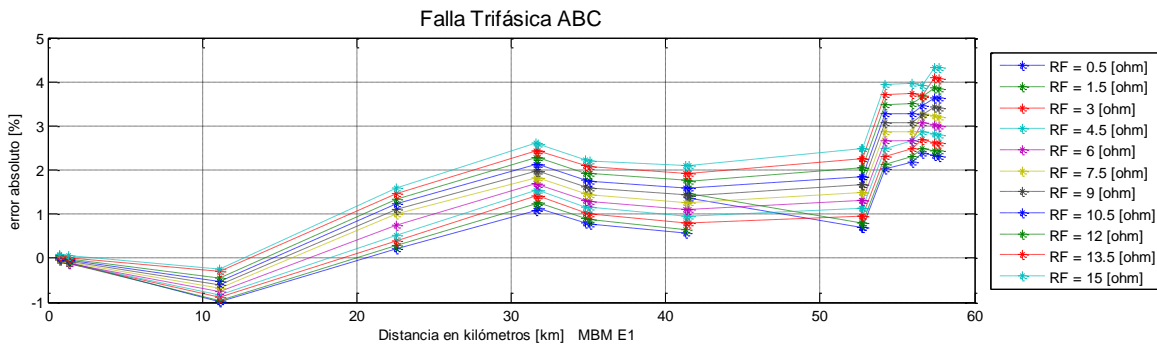


Figura B.1.66

4.3. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [102 - 105]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

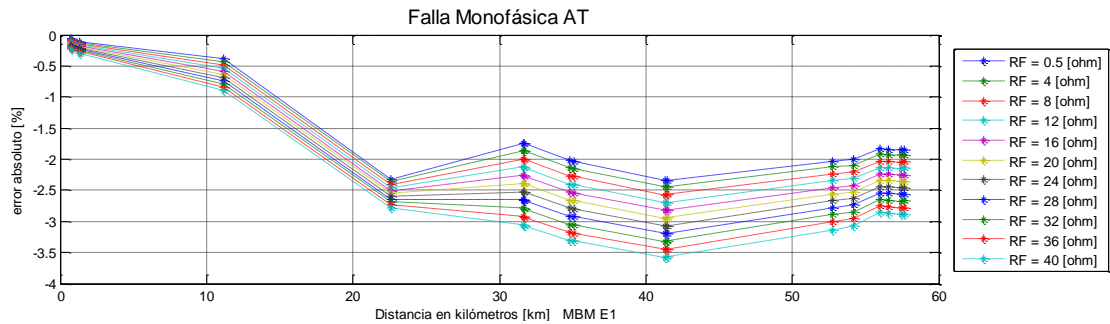


Figura B.1.67

b) Falla bifásica (AB)

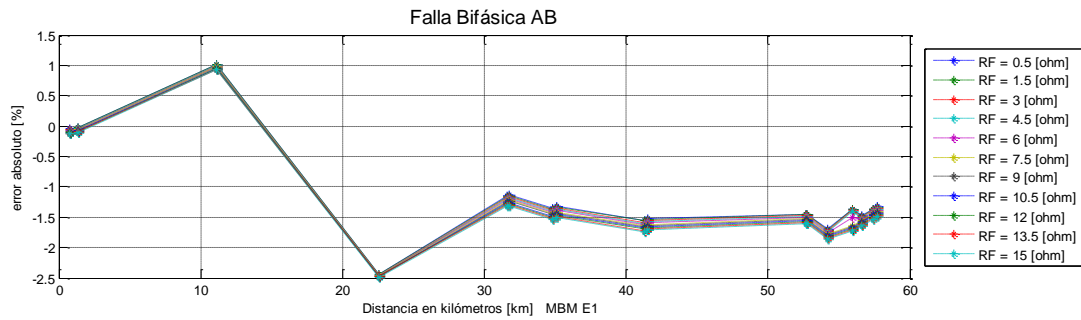


Figura B.1.68

c) Falla trifásica (ABC)

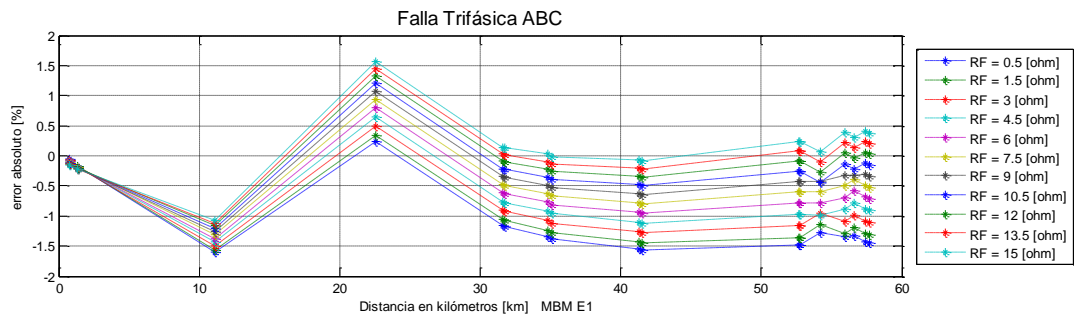


Figura B.1.69

✓ Modelo de Potencia constante (Scte)

a) Falla monofásica (AT)

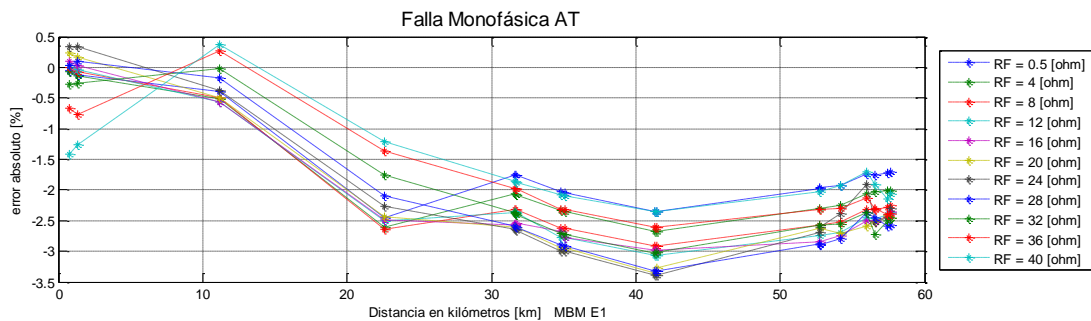


Figura B.1.70

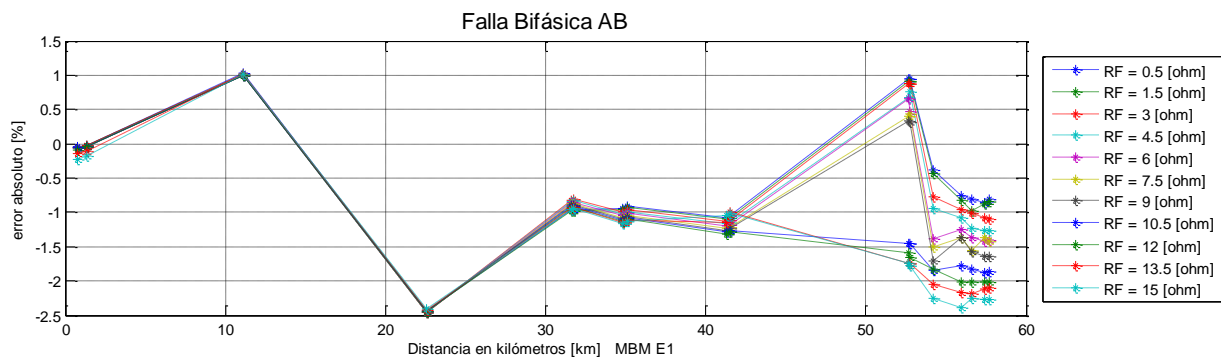
b) *Falla bifásica (AB)*

Figura B.1.71

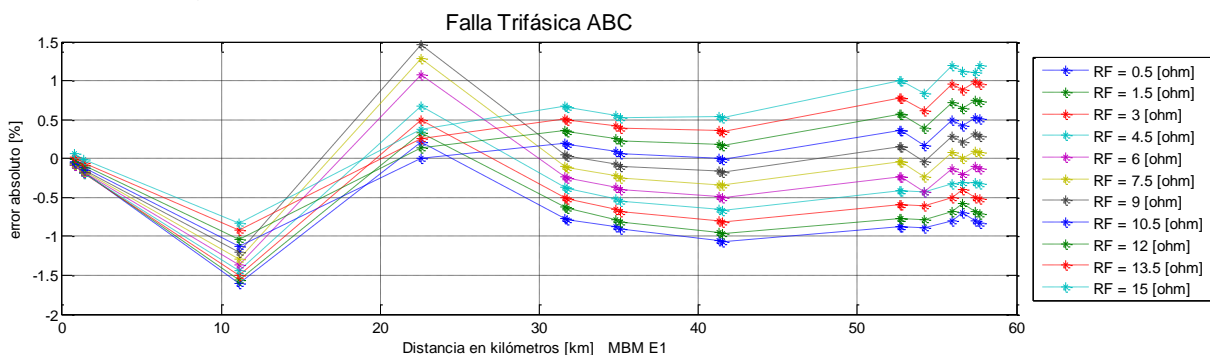
c) *Falla trifásica (ABC)*

Figura B.1.72

Anexo B.2. Gráficas para análisis de sensibilidad del sistema de prueba P2 con el MBM E1

Todos los gráficos muestran el error absoluto definido en la ecuación (4.1) contra la distancia de falla.

1. Validación a condición nominal con circuito modelado como Z_{cte}

a) Falla monofásica (AT)

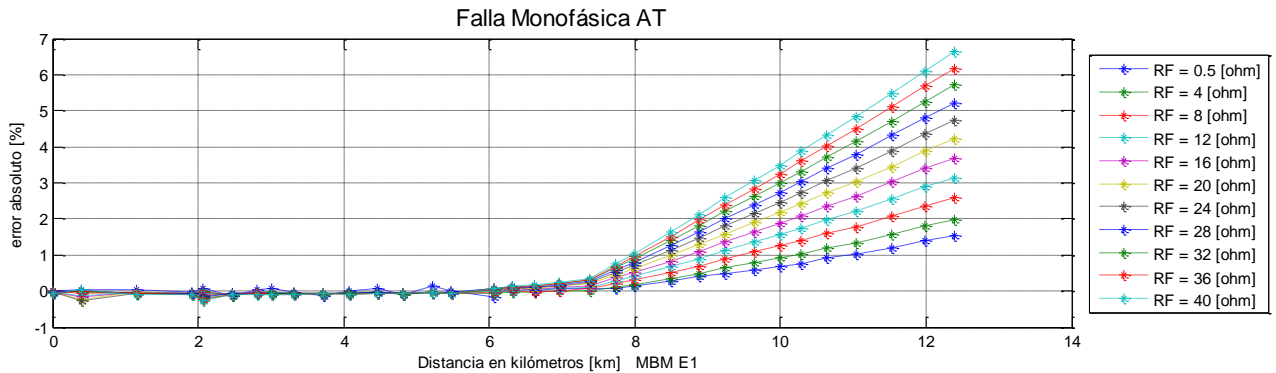


Figura B.2.1

b) Falla bifásica (AB)

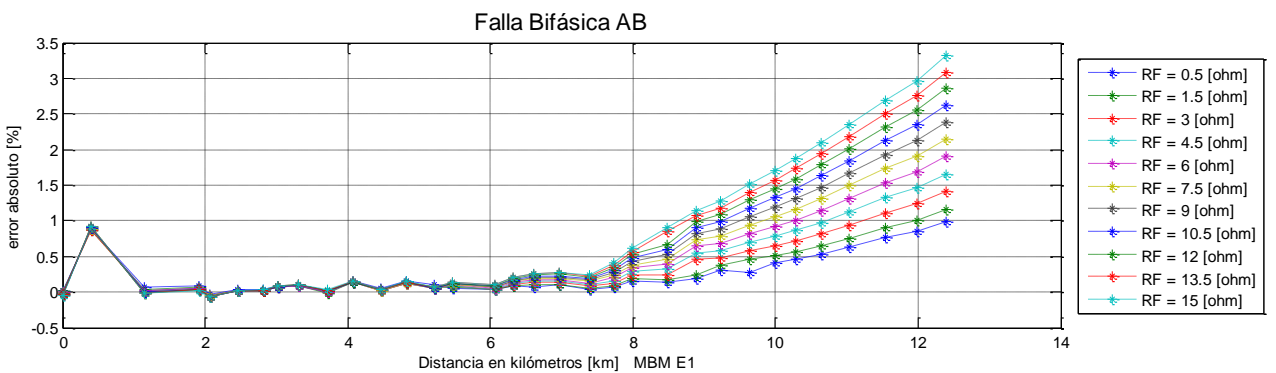


Figura B.2.2

c) Falla trifásica (ABC)

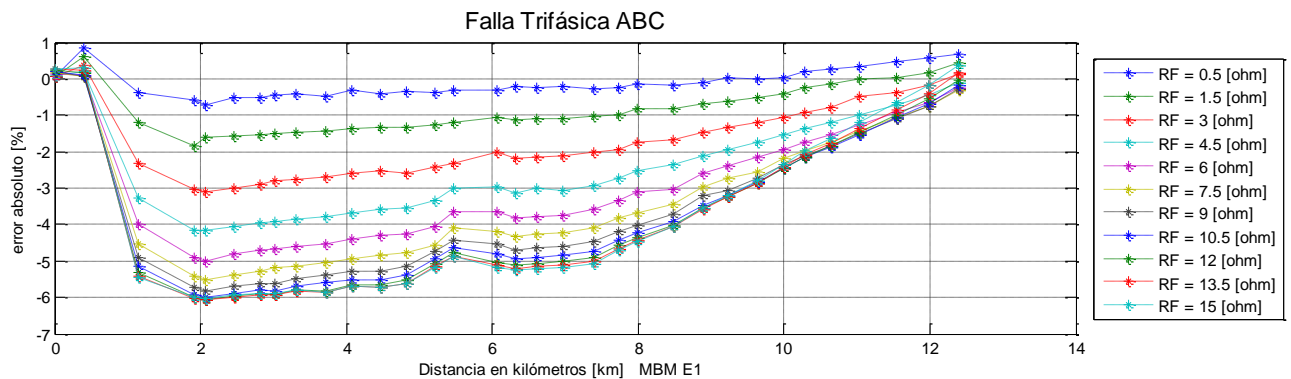


Figura B.2.3

2. Variaciones de carga

2.1. Validación a condición aleatoria de Carga [30 - 60]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

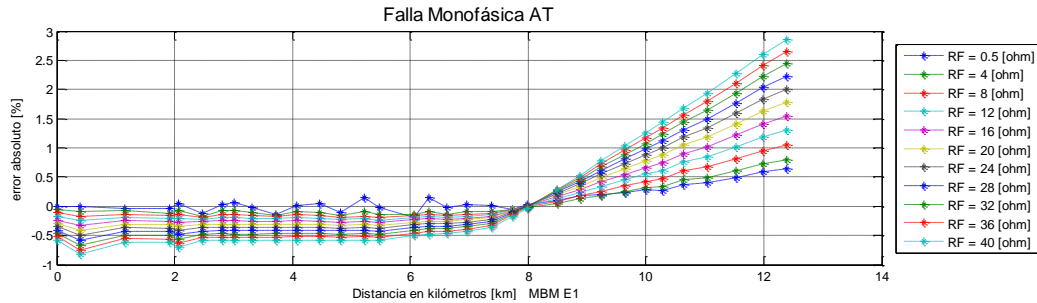


Figura B.2.4

b) Falla bifásica (AB)

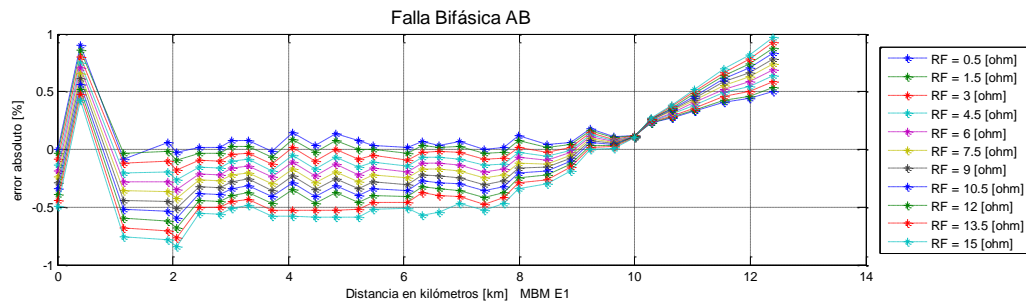


Figura B.2.5

c) Falla trifásica (ABC)

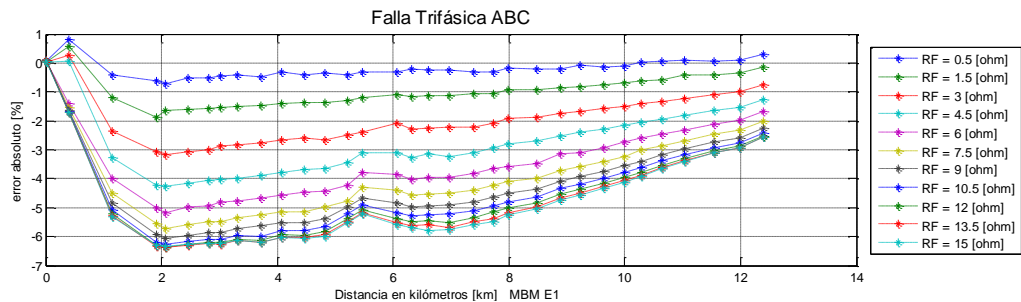


Figura B.2.6

✓ Modelo de corriente constante (Icte)

a) Falla monofásica (AT)

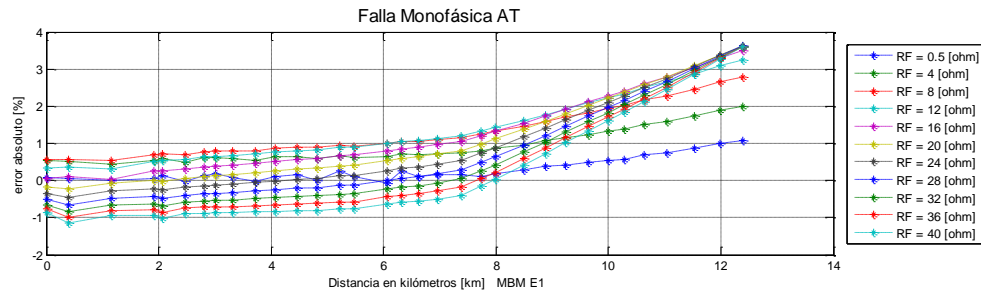
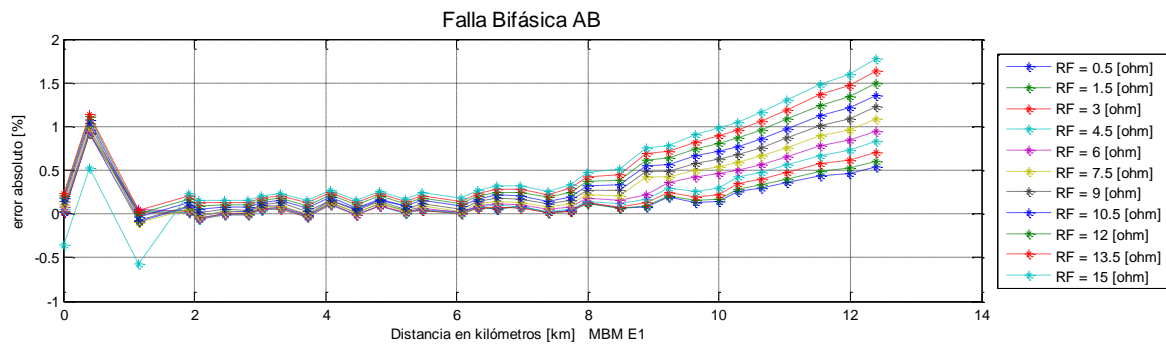
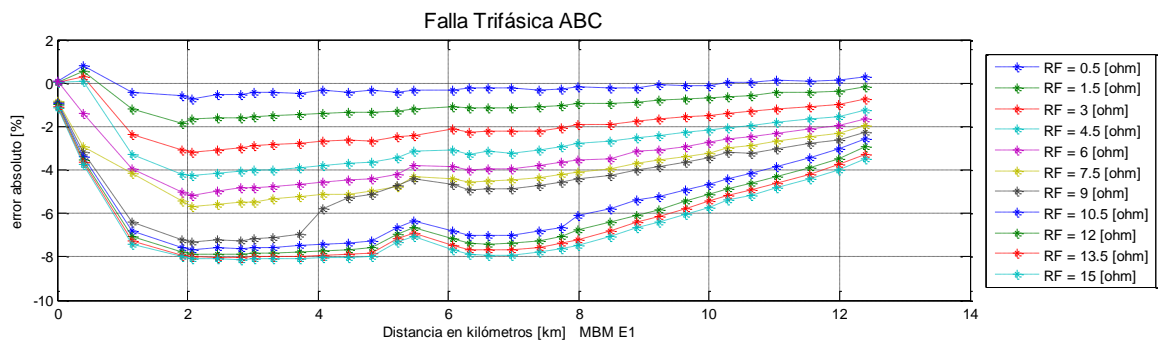


Figura B.2.7

b) *Falla bifásica (AB)*

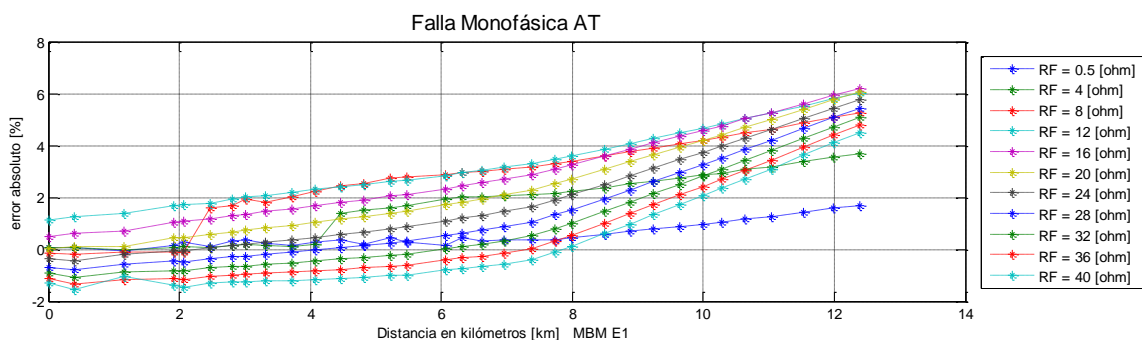


c) *Falla trifásica (ABC)*

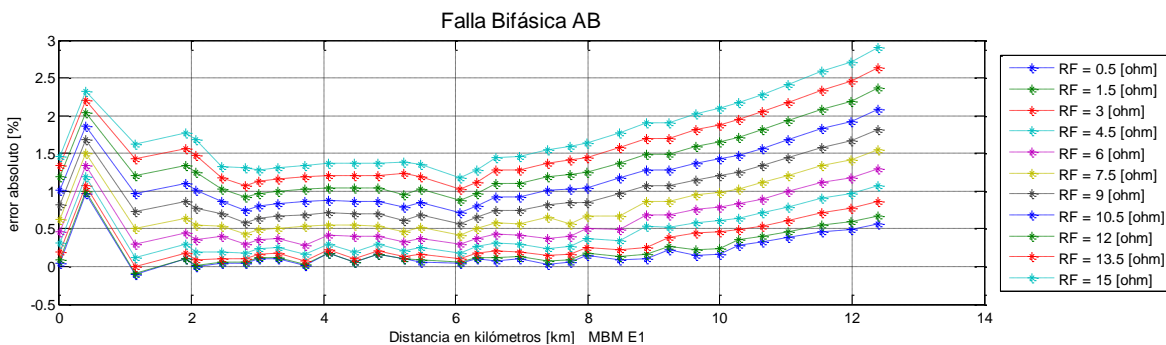


✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

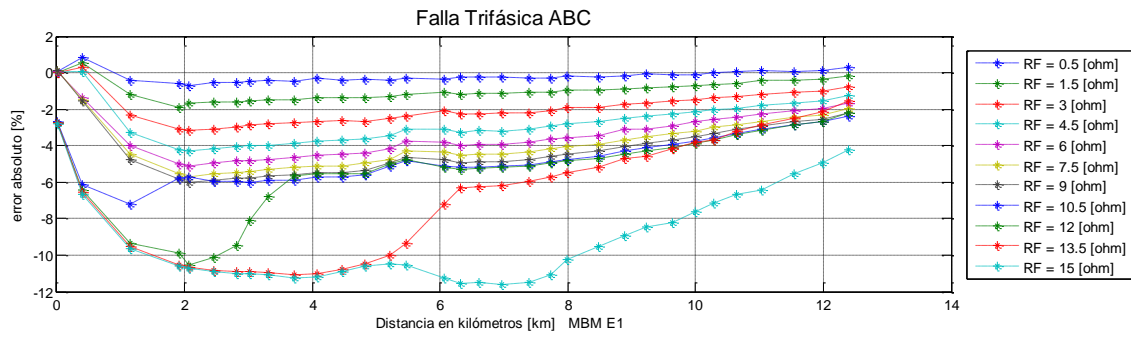


Figura B.2.12

✓ **Modelo híbrido (0.8Icte+0.2Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

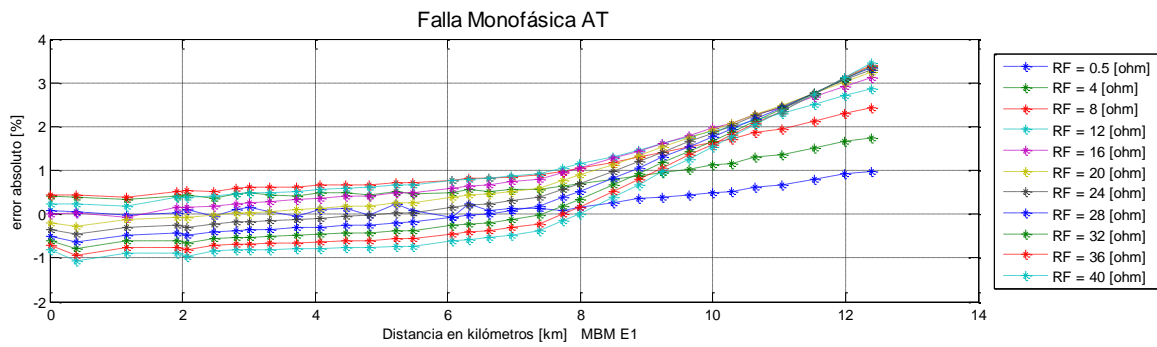


Figura B.2.13

b) *Falla bifásica (AB)*

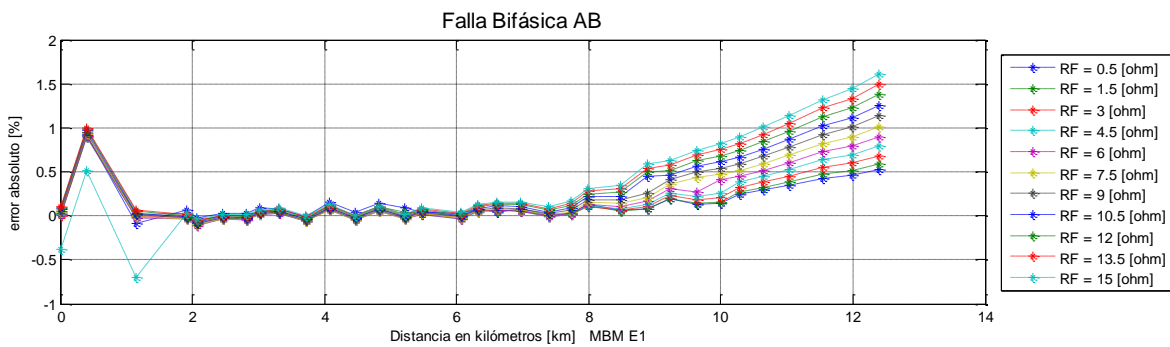


Figura B.2.14

c) *Falla trifásica (ABC)*

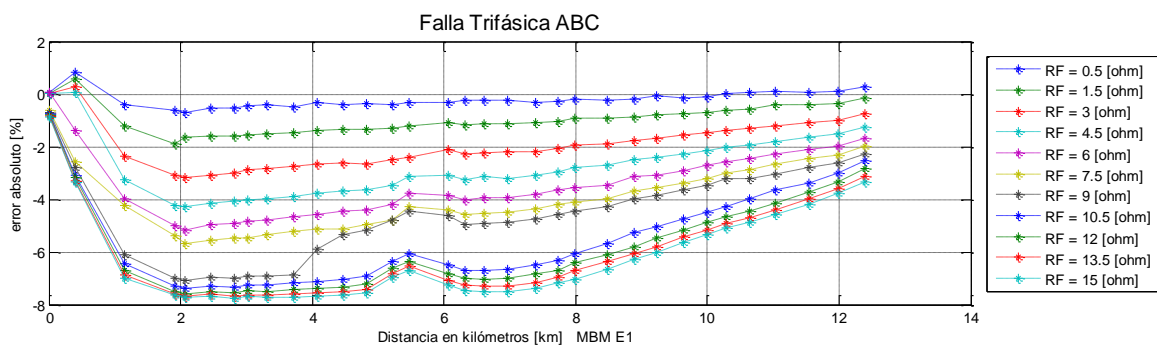


Figura B.2.15

2.2. Validación a condición aleatoria de Carga [80-100]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

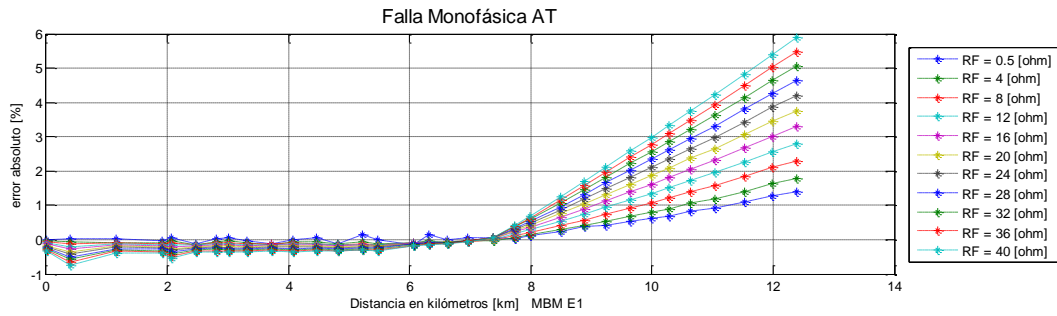


Figura B.2.16

b) Falla bifásica (AB)

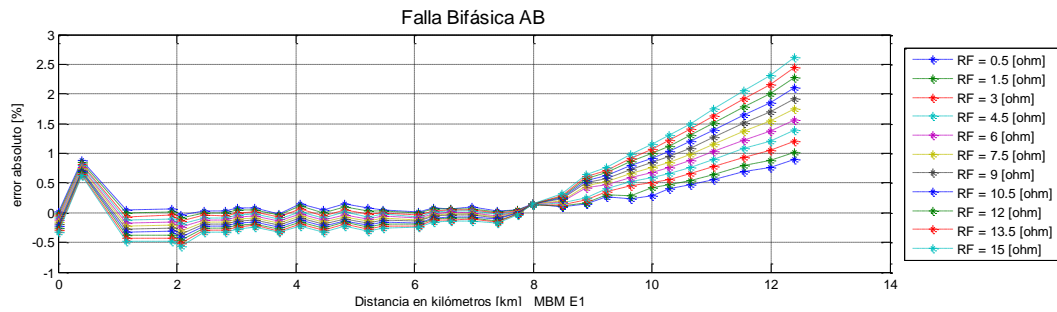


Figura B.2.17

c) Falla trifásica (ABC)

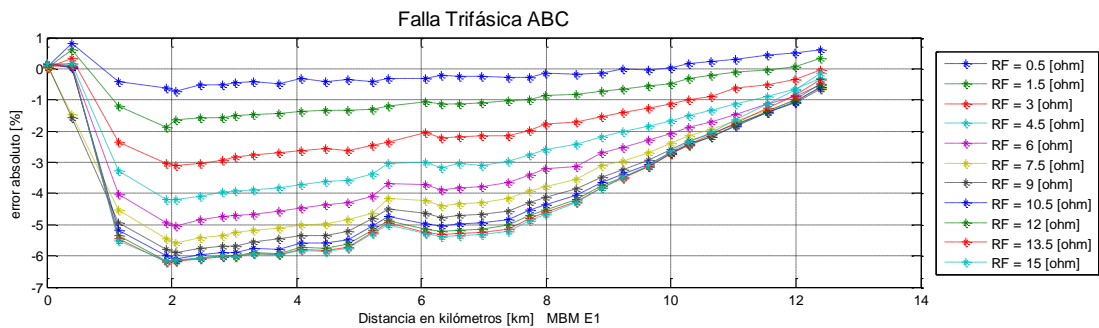


Figura B.2.18

✓ Modelo de corriente constante (Icte)

a) Falla monofásica (AT)

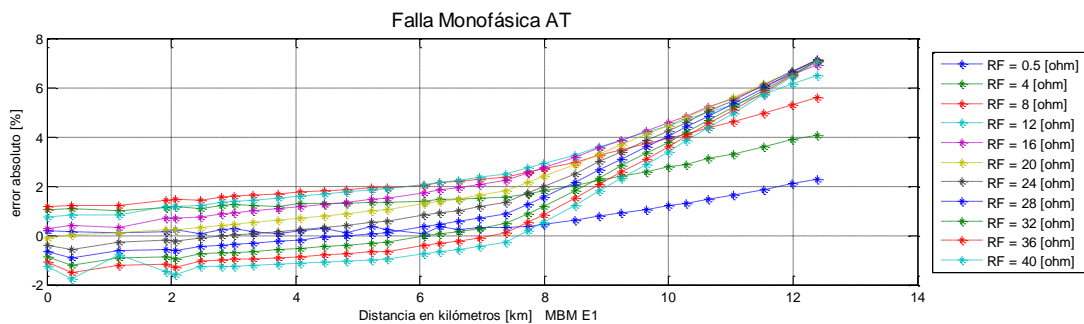


Figura B.2.19

b) *Falla bifásica (AB)*

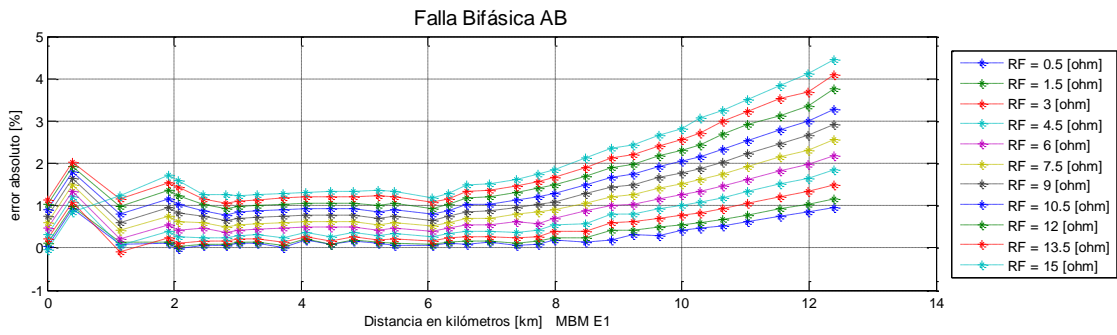


Figura B.2.20

c) *Falla trifásica (ABC)*

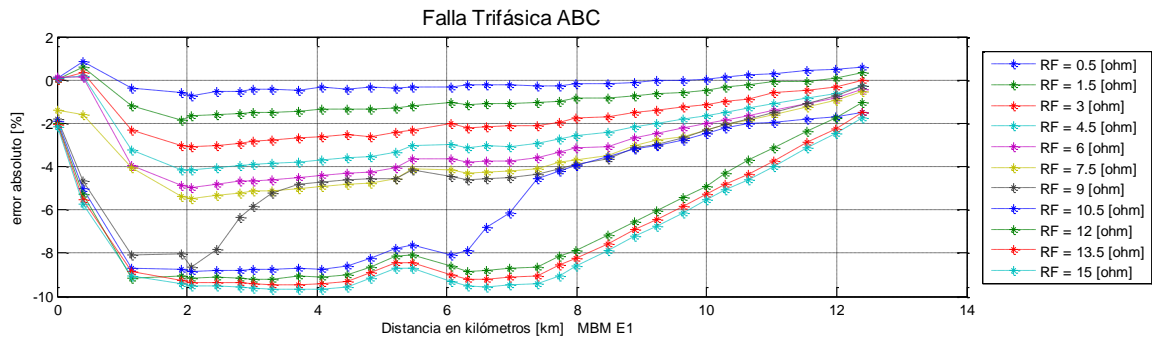


Figura B.2.21

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

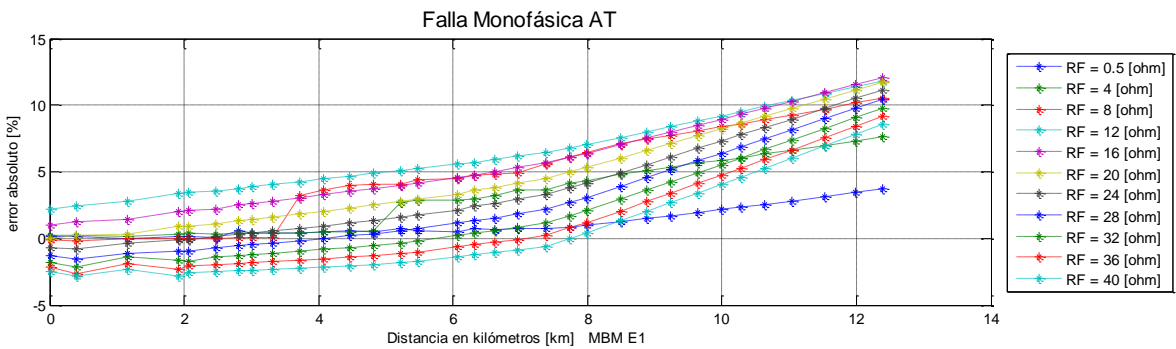


Figura B.2.22

b) *Falla bifásica (AB)*

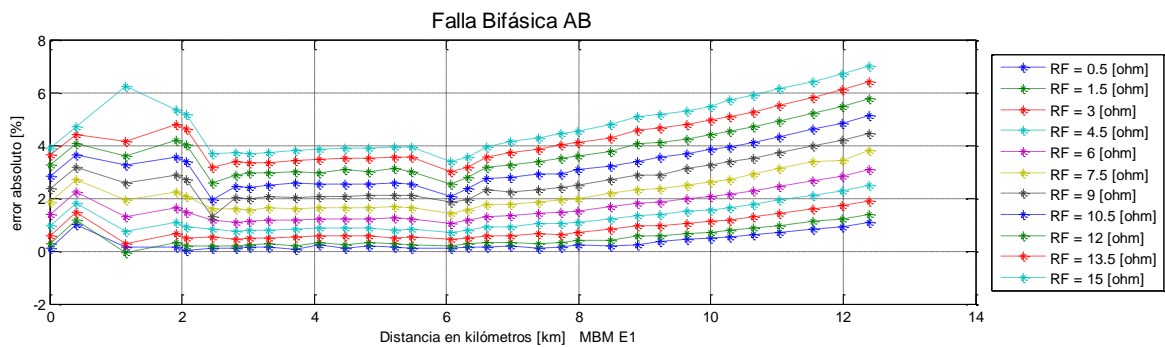


Figura B.2.23

c) *Falla trifásica (ABC)*

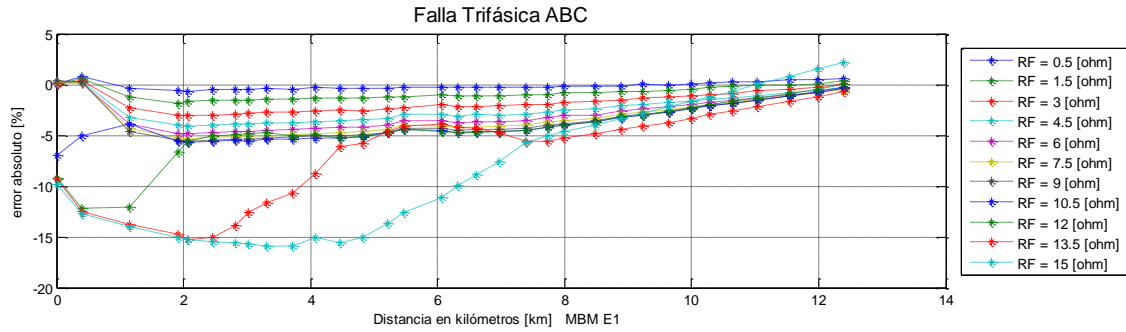


Figura B.2.24

✓ **Modelo híbrido (0.8Icte+0.2Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

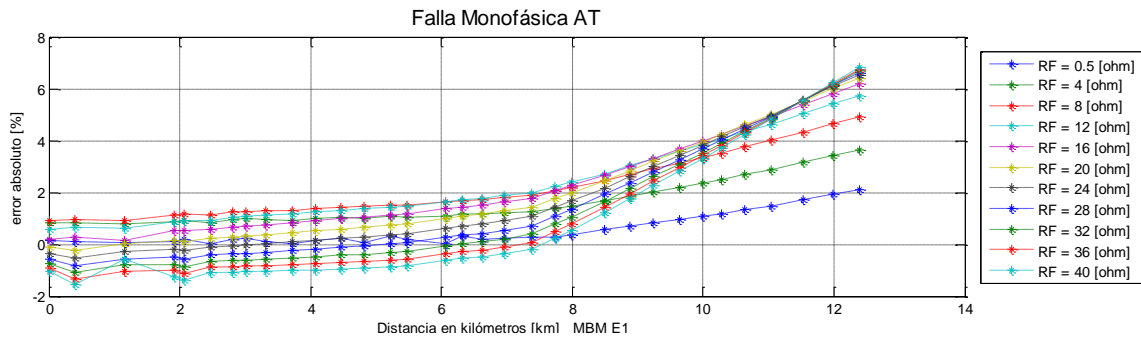


Figura B.2.25

b) *Falla bifásica (AB)*

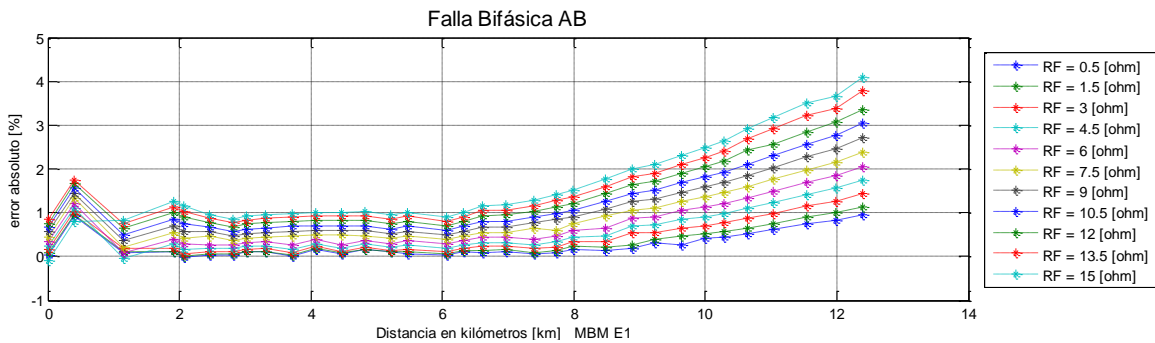


Figura B.2.26

c) *Falla trifásica (ABC)*

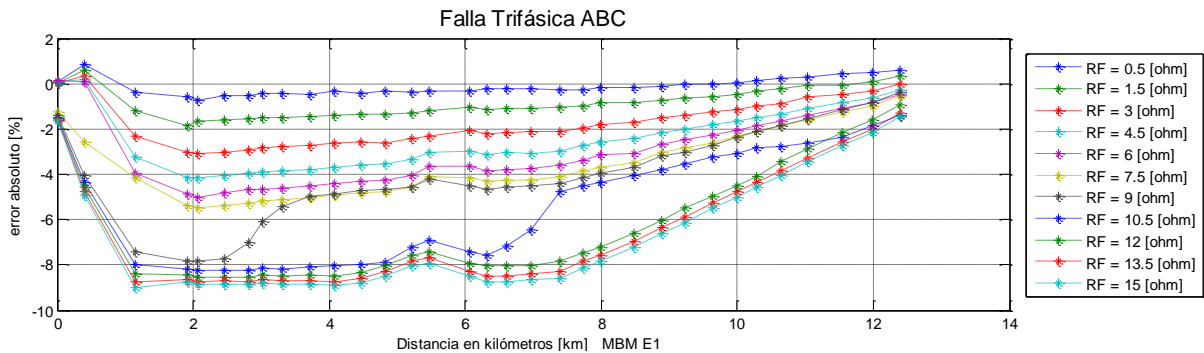


Figura B.2.27

2.3. Validación a condición aleatoria de Carga [110-130]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

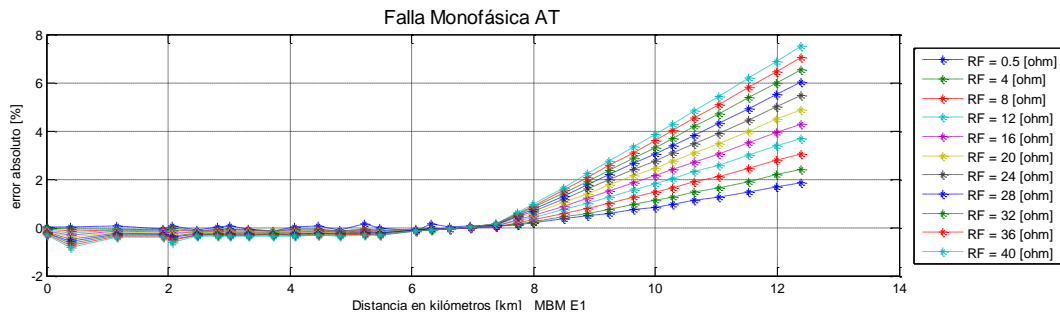


Figura B.2.28

b) Falla bifásica (AB)

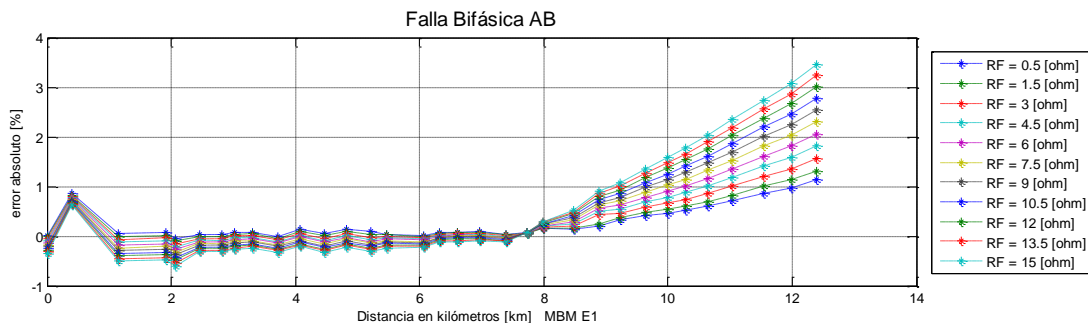


Figura B.2.29

c) Falla trifásica (ABC)

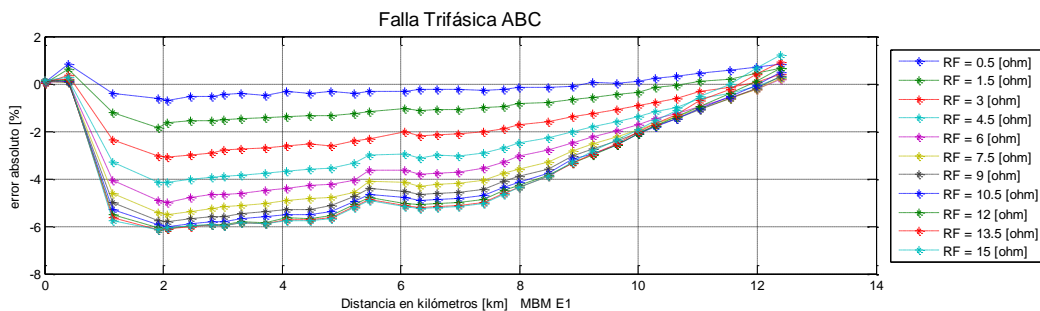


Figura B.2.30

✓ Modelo de corriente constante (Icte)

a) Falla monofásica (AT)

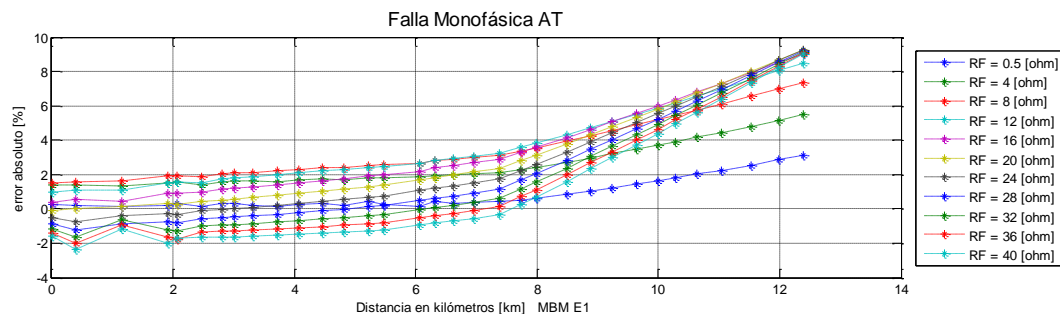
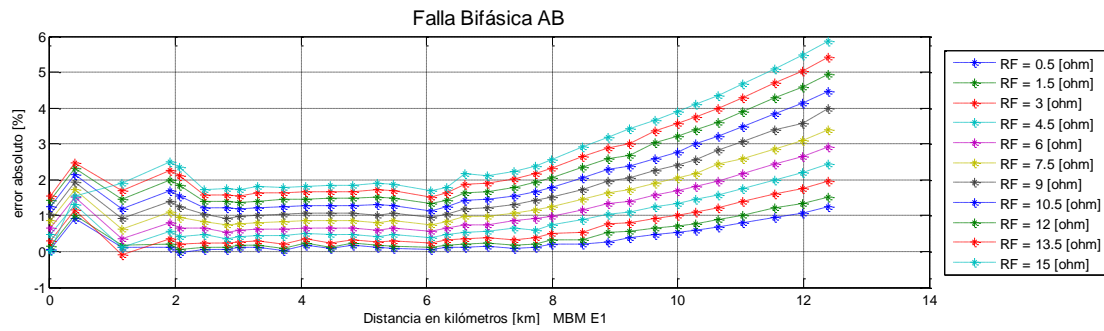
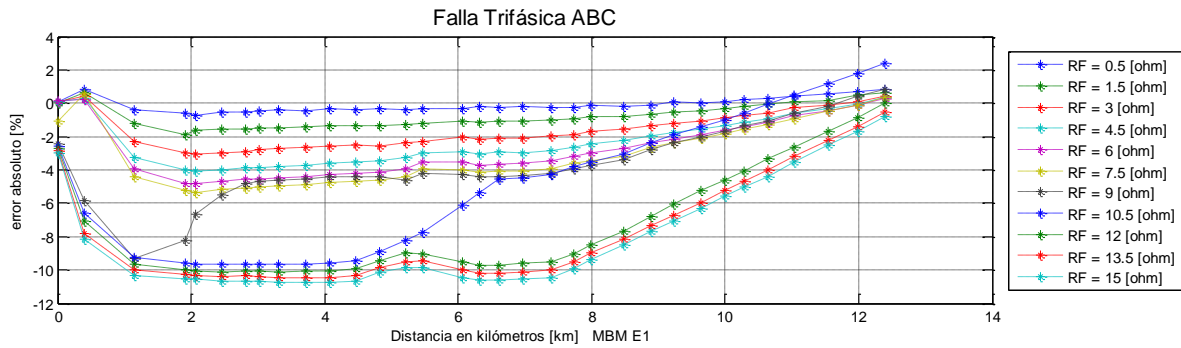


Figura B.2.31

b) *Falla bifásica (AB)*

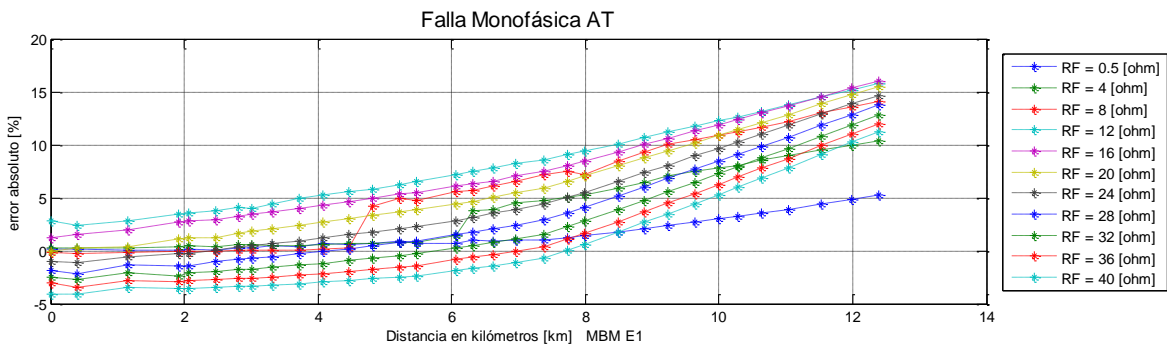


c) *Falla trifásica (ABC)*

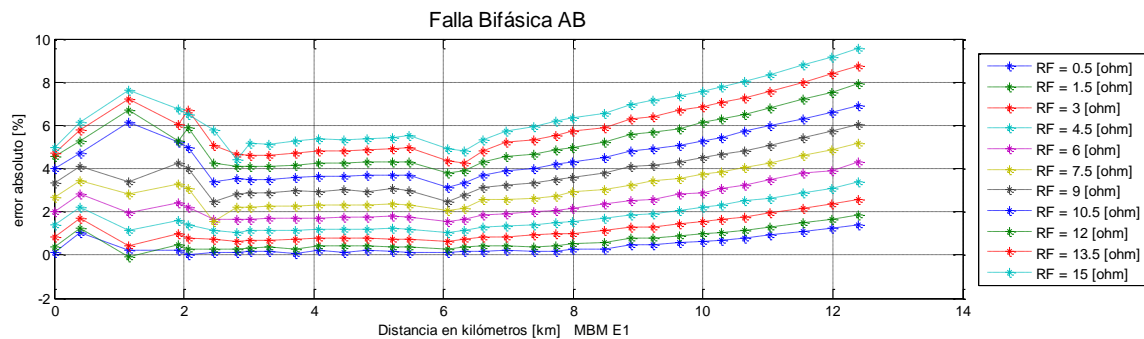


✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

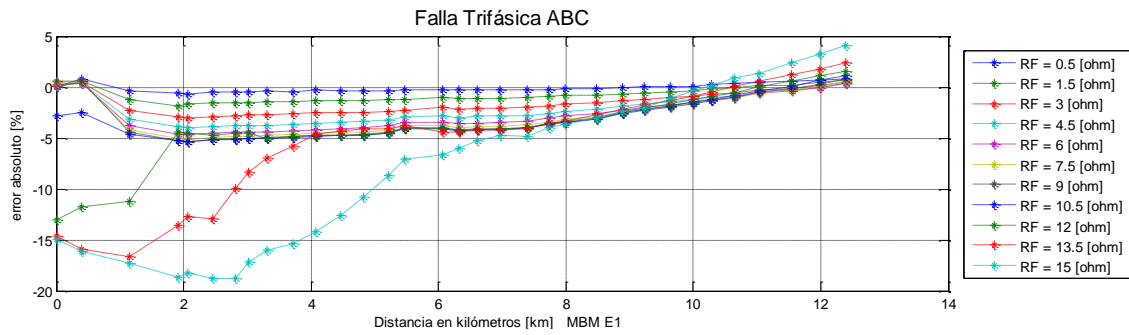


Figura B.2.36

✓ **Modelo híbrido (0.8Icte+0.2Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

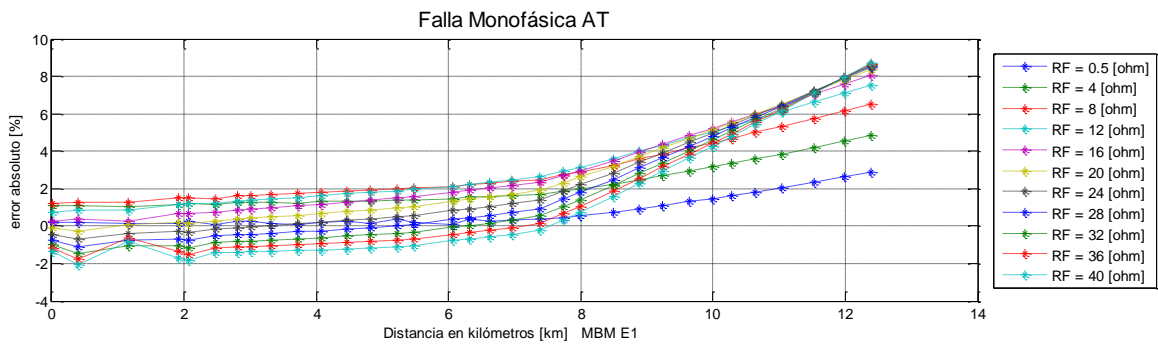


Figura B.2.37

b) *Falla bifásica (AB)*

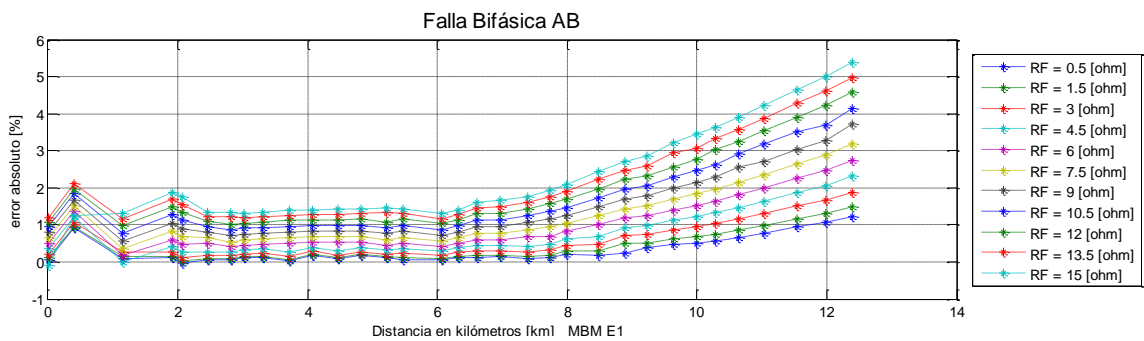


Figura B.2.38

c) *Falla trifásica (ABC)*

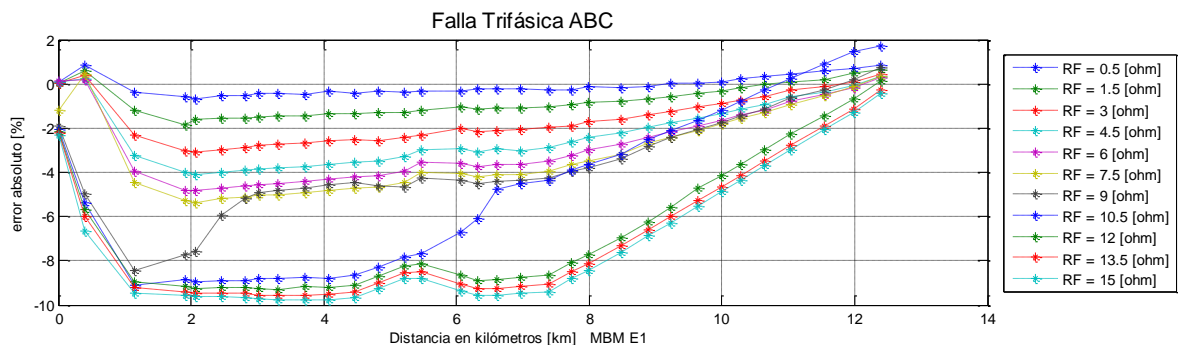


Figura B.2.39

3. Variación aleatoria de la magnitud de la tensión de la Fuente

3.1. Variación aleatoria de la Tensión de la Fuente [0.95 – 1.05]

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

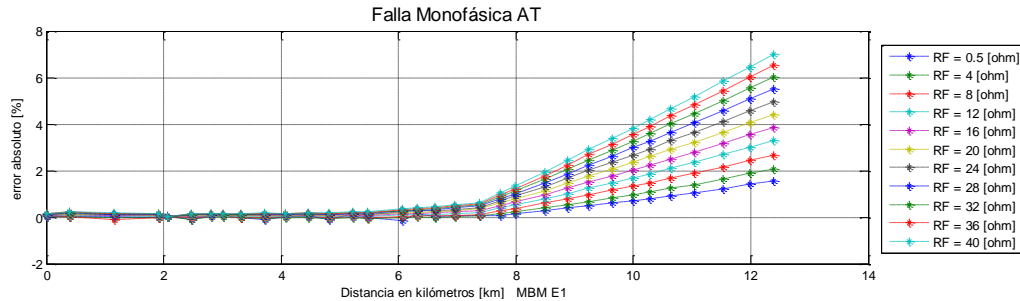


Figura B.2.40

b) *Falla bifásica (AB)*

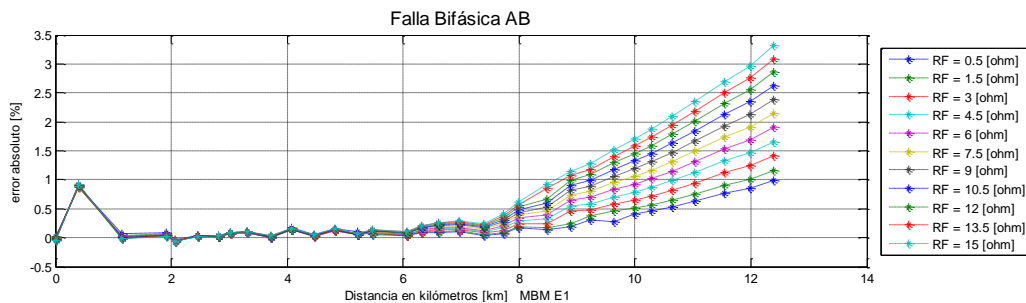


Figura B.2.41

c) *Falla trifásica (ABC)*

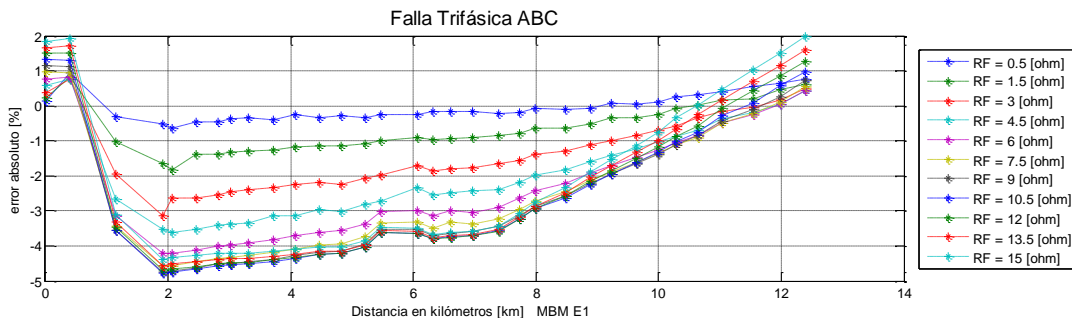


Figura B.2.42

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

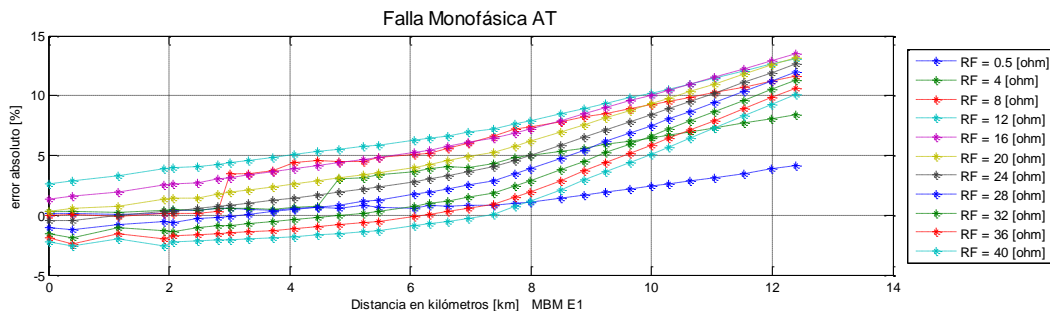


Figura B.2.43

b) *Falla bifásica (AB)*

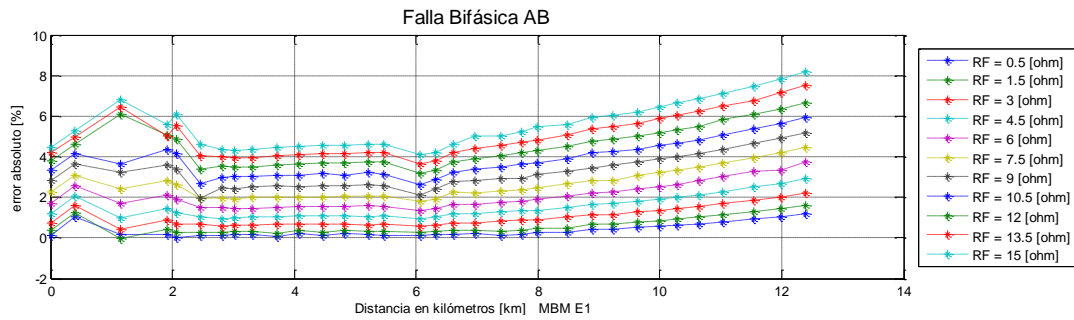


Figura B.2.44

c) *Falla trifásica (ABC)*

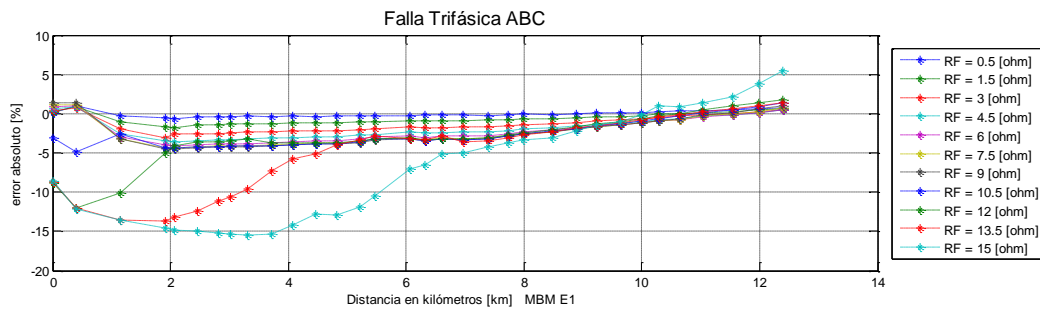


Figura B.2.45

4. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores

4.1. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [95 - 98]%

✓ Modelo de impedancia constante (Z_{cte})

a) *Falla monofásica (AT)*

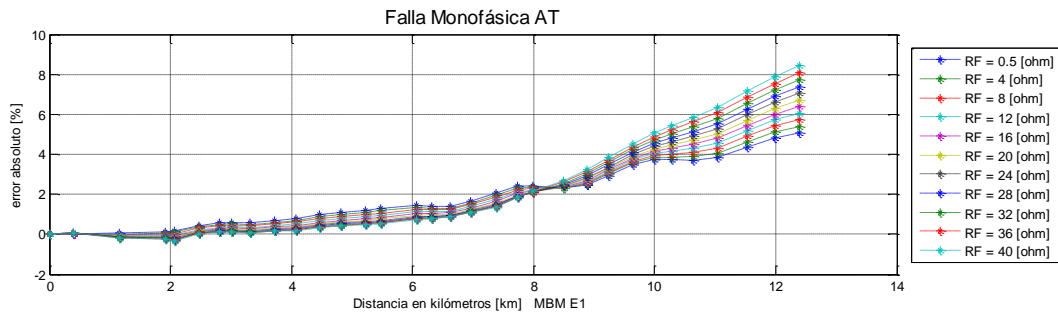


Figura B.2.46

b) *Falla bifásica (AB)*

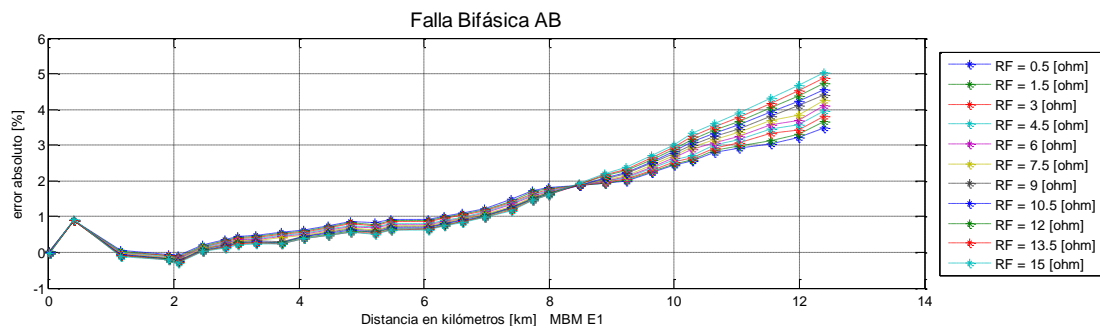


Figura B.2.47

c) *Falla trifásica (ABC)*

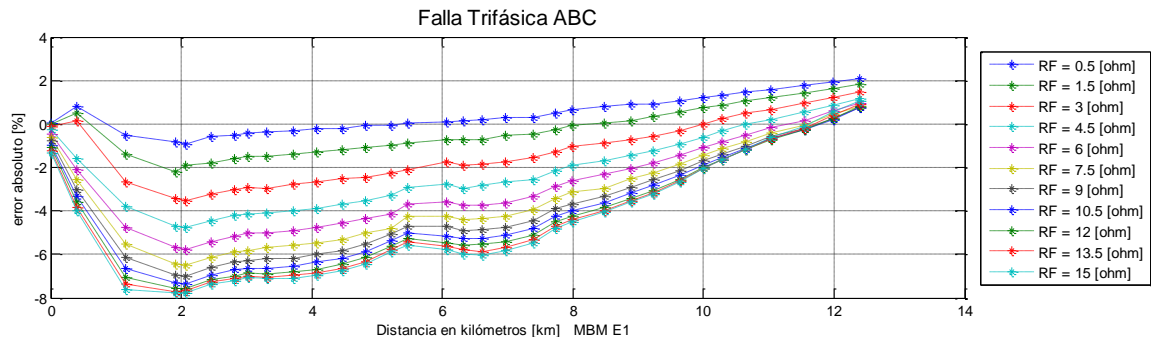


Figura B.2.48

✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

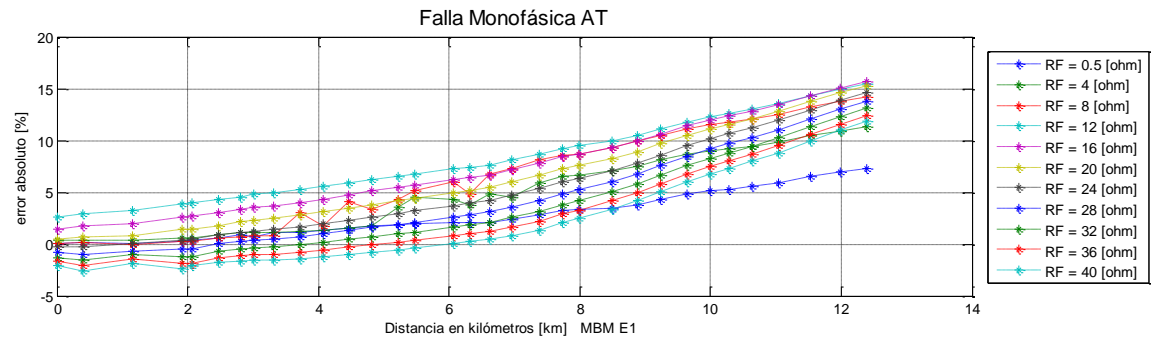


Figura B.2.49

b) *Falla bifásica (AB)*

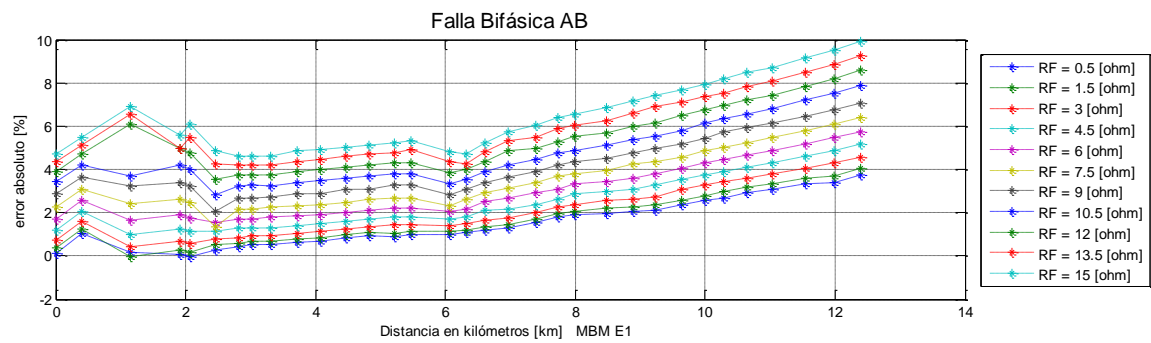


Figura B.2.50

c) *Falla trifásica (ABC)*

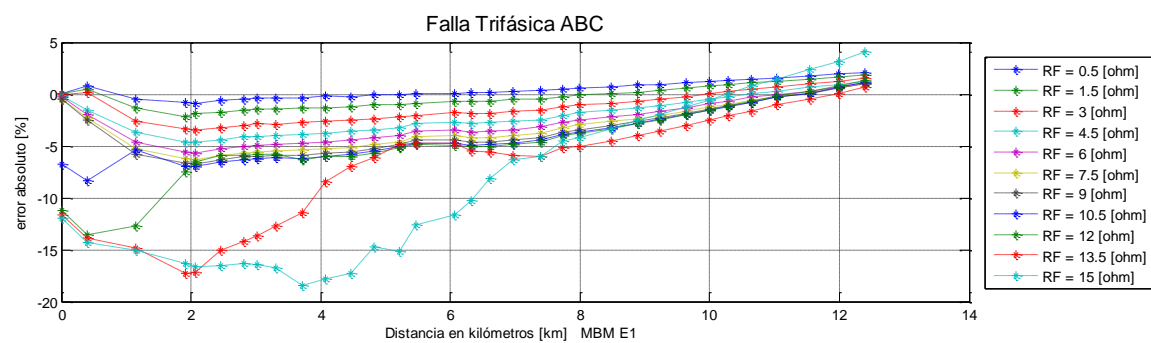


Figura B.2.51

4.2. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [98 - 102]%

✓ Modelo de impedancia constante (Zcte)

a) Falla monofásica (AT)

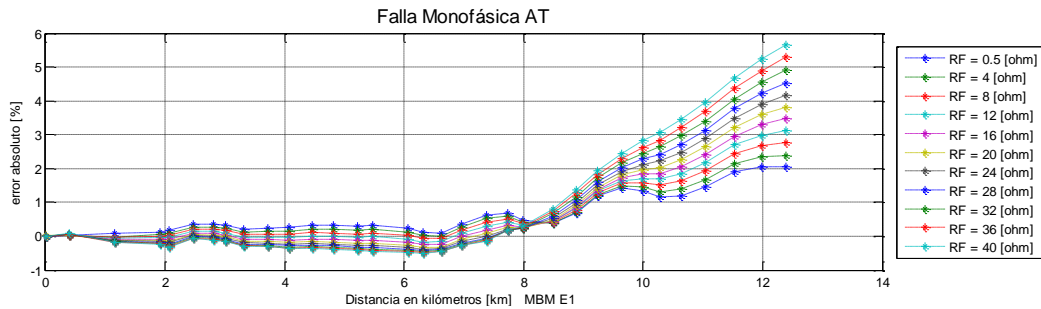


Figura B.2.52

b) Falla bifásica (AB)

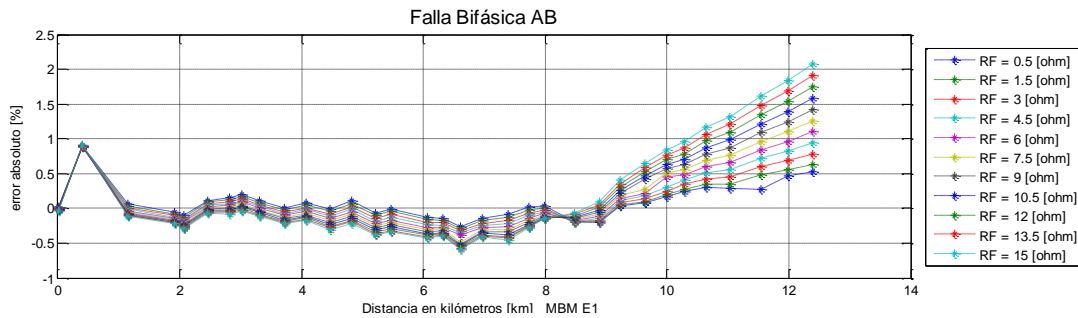


Figura B.2.53

c) Falla trifásica (ABC)

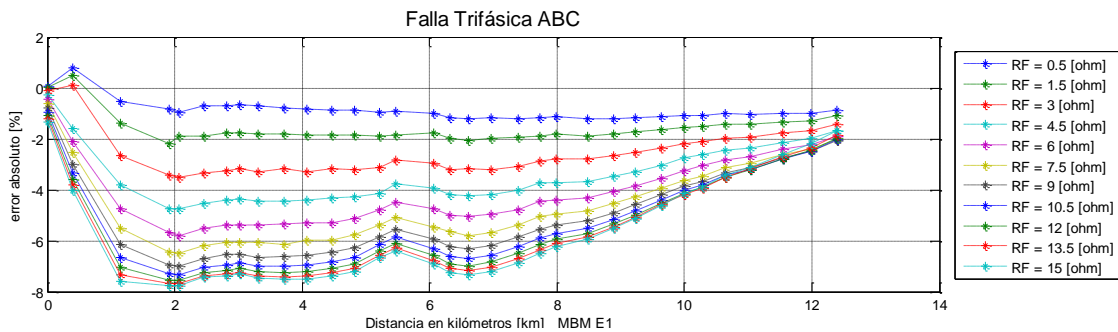


Figura B.2.54

✓ Modelo de Potencia constante (Scte)

a) Falla monofásica (AT)

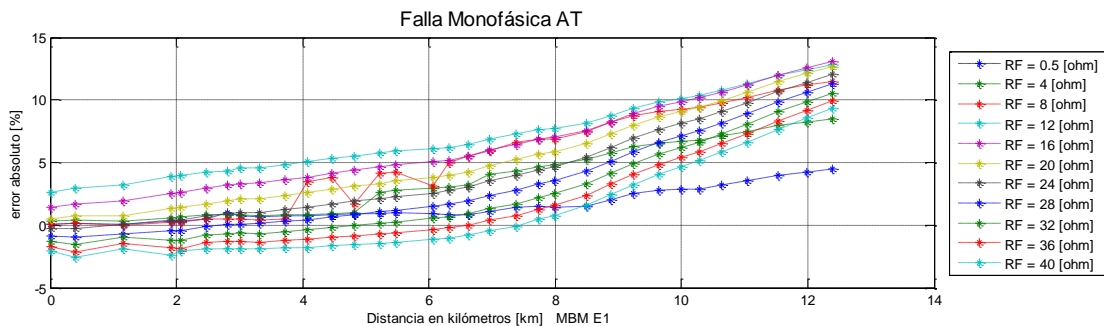


Figura B.2.55

b) *Falla bifásica (AB)*

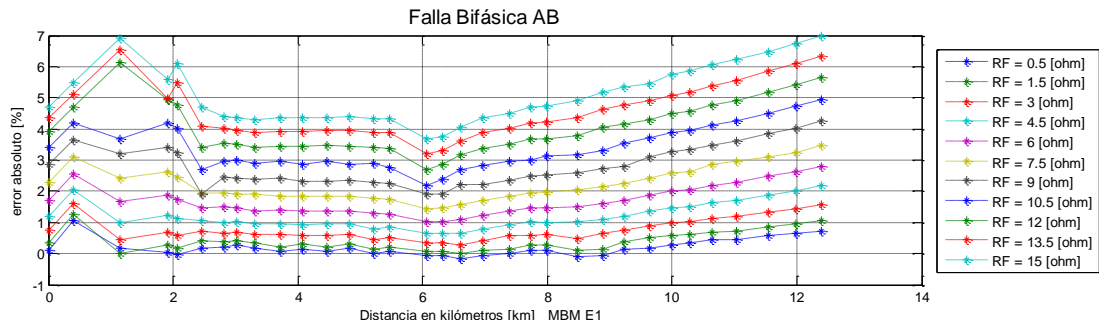


Figura B.2.56

c) *Falla trifásica (ABC)*

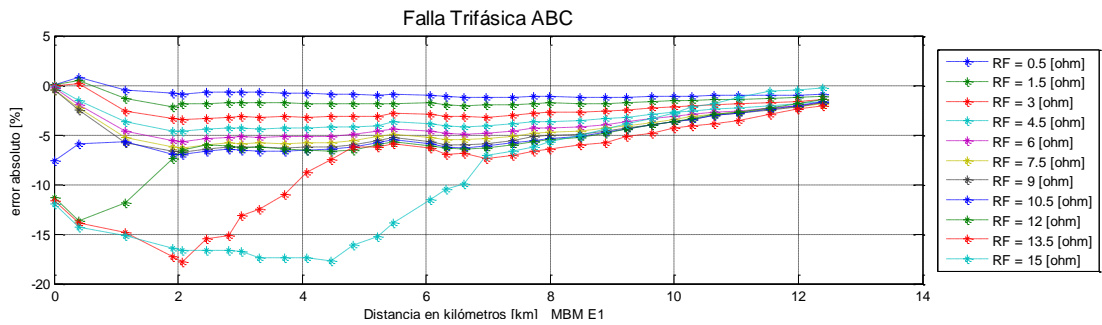


Figura B.2.57

4.3. Variación aleatoria de la Longitud de los conductores [102 - 105]%

✓ **Modelo de impedancia constante (Zcte)**

a) *Falla monofásica (AT)*

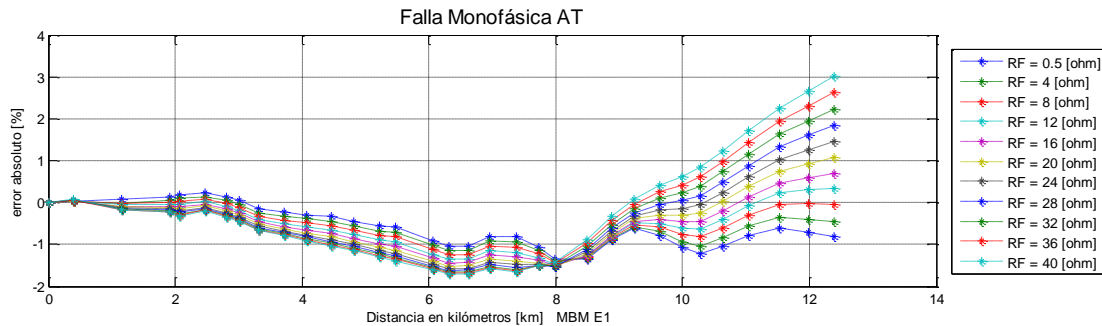


Figura B.2.58

b) *Falla bifásica (AB)*

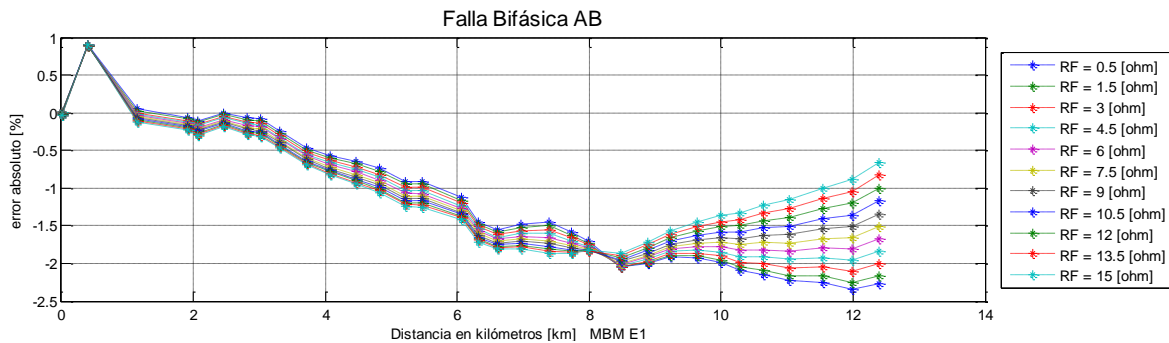
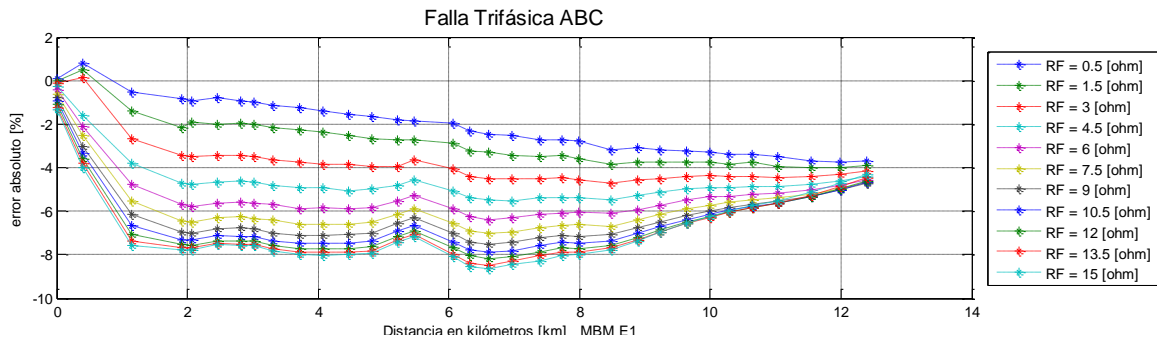


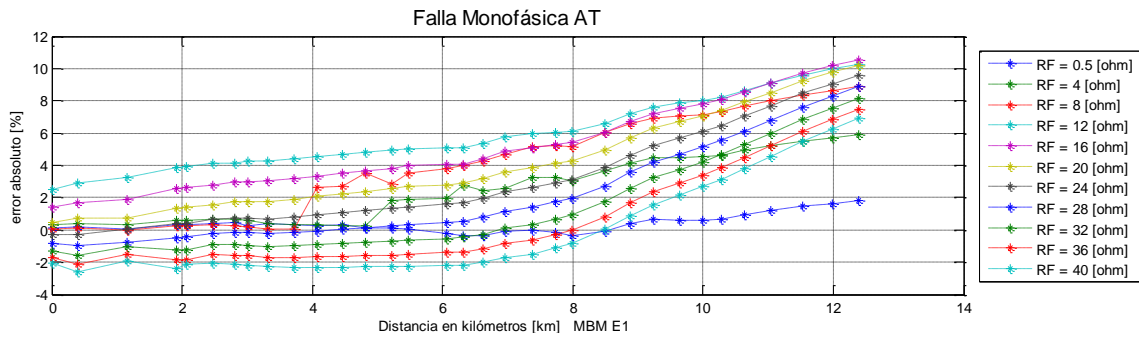
Figura B.2.59

c) *Falla trifásica (ABC)*

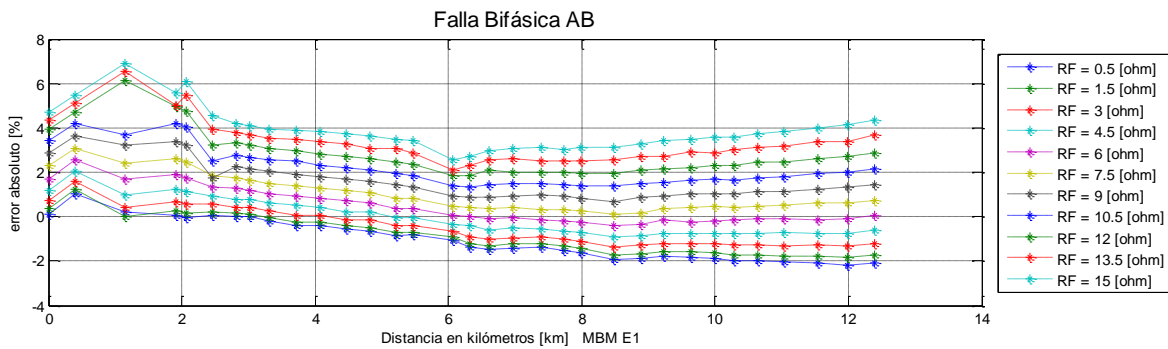


✓ **Modelo de Potencia constante (Scte)**

a) *Falla monofásica (AT)*



b) *Falla bifásica (AB)*



c) *Falla trifásica (ABC)*

